



Luís Miguel Alves Barreiro

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo numérico da estabilidade das plataformas semi-submersíveis DeepCwind e TLP para suporte de turbinas eólicas offshore

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Moisés Gonçalves de Brito, Investigador Doutoramento, IST/UL

Coorientador: Professor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutor Daniel Cardoso Vaz

Arguente: Doutor José Manuel Paixão Conde

Vogal: Doutor Moisés Gonçalves de Brito



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2019

**Estudo numérico da estabilidade das plataformas semi-submersíveis
DeepCwind e TLP para suporte de turbinas eólicas offshore**

Copyright © Luís Miguel Alves Barreiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais.

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha mais sincera gratidão ao meu Orientador, Professor Moisés Gonçalves de Brito, por disponibilizar o seu tempo a compartilhar conhecimentos no campo da flutuação de plataformas semi-submersíveis e por oferecer sugestões valiosas para a pesquisa bibliográfica. A sua orientação e o seu apoio constante foram fatores determinantes para a concretização da dissertação.

Agradecimentos especiais ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL, em especial ao Professor Luís Miguel Chagas da Costa Gil por disponibilizar o laboratório de Fluidos Computacionais para a realização das simulações e pela sua ajuda na revisão do texto e dos conceitos científicos abordados na presente dissertação.

Os meus agradecimentos aos meus colegas de laboratório, em especial ao Tiago, ao Rafael e ao Nuno, pelos momentos e conhecimentos partilhados. Também gostaria de expressar a minha gratidão aos meus colegas: João, André, Joana, Sebastião, Ricardo, António e Rafael por todo o apoio, paciência e compreensão que demonstraram comigo.

Por fim, a minha mais sincera gratidão à minha família e namorada pelo seu apoio incansável e incentivo para concretização desta dissertação.

Resumo

As plataformas DeepCwind e TLP (Tension-Leg Platform) representam uma importante classe de estruturas semi-submersíveis e destinam-se a suportar e a assegurar a sobrevivência e a operacionalidade de turbinas eólicas offshore.

O principal objetivo desta dissertação é estudar o comportamento das plataformas ao interagirem com agitação regular e irregular. O programa utilizado é o DualSPHysics. Este código baseia-se no método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) para resolver as equações que gerem a dinâmica dos fluidos.

O código numérico é previamente verificado e testado através da comparação com resultados numéricos e analíticos existentes na literatura. Seguidamente, é aplicado no estudo da cinemática das plataformas offshore sobre a ação de onda de agitação regular e irregular.

Os resultados demonstram a utilidade do código DualSPHysics neste estudo, pois permitiram calcular os movimentos de arfagem e de balanço. Concluiu-se que a operacionalidade das duas plataformas é idêntica. Contudo, é perceptível que a plataforma DeepCwind apresenta-se mais estática que a plataforma TLP.

Palavras-chave: DualSPHysics, DeepCwind, TLP, cinemática, agitação regular, irregular.

Abstract

The DeepCwind and TLP (Tension-Leg Platform) represents an important class of the semi-submersible structures and is destined to support and ensure the survival and operability of the offshore wind turbines.

The main objective of this dissertation is to study the behavior of the platform when it interacts with regular and irregular wave agitation. DualSPHysics was the software used. The code was based on the *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) method to solve the equations characteristics of the fluids dynamics.

The numerical code is previously verified and tested through the comparison with numeric and analitic results that can be found in the literature. Then, is applied the cinematic study of the offshore platforms under regular and irregular wave agitation.

The results demonstrate the utility of the DualSPHysics in this study, because it allows us to calculate the rotational and vertical moviment. In conclusion, the operability of the two platforms is identical. However, can be noted that the DeepCwind platform presents more stability than the TLP platform.

Key words: DualSPHysics, DeepCwind, TLP, cinematic, regular, irregular agitation.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xv
Abreviaturas e Acrónimos	xvii
Lista de Variáveis.....	xix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do trabalho.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão bibliográfica	7
2.1. Propagação de ondas regulares e irregulares	7
2.1.1. Teoria linear de ondas (Stokes 1ª ordem).....	7
2.1.2. Teoria de 2ª ordem de Stokes	10
2.1.3. Teoria irregular	12
2.2. Estado de arte das plataformas semi-submersíveis	15
2.3. Descrição da geometria das plataformas DeepCwind e TLP.....	17
2.3.1 Geometria da plataforma DeepCwind e suas componentes	18
2.3.2 Geometria da plataforma TLP e suas componentes.....	22
2.3.3 Sistemas de Coordenadas	24
3. Modelo Numérico	27

3.1.	Método SPH	27
3.1.1	Kernel de interpolação	28
3.1.2	Equação da continuidade.....	28
3.1.3	Equação de estado.....	29
3.1.4	Equação da conservação da quantidade de movimento	29
3.2.	Condições de fronteira do modelo SPH	30
3.2.1	Interação fluido - corpo flutuante	31
3.2.2	Esquemas de integração numérica.....	32
3.2.2.1	Esquema de Symplectic.....	32
3.3.	Parâmetros numéricos utilizados	34
3.4.	Geração de ondas com absorção ativa.....	36
3.5.	Implementação do CPU e GPU no modelo SPH	37
4.	Testes e verificação do código DualSPHysics na cinemática e dinâmica de corpos flutuantes.....	39
4.1.	Interação onda regular-corpo flutuante 2D.....	39
4.1.1	Verificação da cinemática e dinâmica (estudo bidimensional)	41
4.2.	Interação onda-corpo flutuante 3D.....	51
4.2.1	Teste tridimensional para ondas regulares	52
4.2.2	Teste tridimensional para ondas irregulares	56
5.	Estudo do comportamento das plataformas	59
5.1.	Plataformas DeepCwind e TLP	59
5.2.	Domínio de cálculo e caracterização da agitação.....	61
5.3.	Cinemática da plataforma DeepCwind com agitação regular e irregular	63
5.4.	Cinemática da plataforma TLP agitação regular e irregular	66
5.5.	Comparação da cinemática das plataformas DeepCwind e TLP	69
6.	Conclusão.....	71
6.1.	Desenvolvimentos para trabalhos futuros.....	72

Bibliografia.....	73
--------------------------	-----------

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Metodologia de otimização	3
Figura 2.1 - Perfis de velocidade da onda progressiva em relação ao comprimento de onda [3].....	9
Figura 2.2 – Características de águas pouco profundas, intermédias e profundas.....	9
Figura 2.3 - Intervalos de aplicabilidade das várias teorias de onda [5]	12
Figura 2.4 - Combinação de diferentes ondas com sentidos aleatórios e não periódicas [5]	13
Figura 2.5 - Espectro empírico de JONSWAP (adaptado: [5])	14
Figura 2.6 - Modo de instalação das plataformas TLP em relação à profundidade [7].....	16
Figura 2.7 - Representação das plataformas offshore TLP (esquerda) e DeepCwind (direita)	16
Figura 2.8 - Sistema (aerogerador, torre e plataforma flutuante) em escala real [10].....	17
Figura 2.9 - Plataforma offshore TLP acoplada a uma turbina eólica	18
Figura 2.10 - Esboço da plataforma DeepCwind.....	19
Figura 2.11 - Principais componentes que definem a plataforma DeepCwind.....	20
Figura 2.12 - Sistema de amarração na plataforma DeepCwind [10]	21
Figura 2.13 - Relações geométricas para uma plataforma TLP.....	22
Figura 2.14 - Componentes da plataforma TLP (adaptado: [11]).....	23
Figura 2.15 - Representação do eixo referente aos 6 graus de liberdade do corpo flutuante	25
Figura 3.1 - Domínio de influência do kernel de interpolação (adaptado: [14])	27
Figura 3.2 - Esquema numérico do DualSPHysics com ficheiros de entrada (vermelho) e ficheiros de saída (azul) (Adaptado: [19])	34
Figura 3.3 - Fluxograma da implementação CPU (esquerda) e GPU (direita) no método SPH (Adaptado: [19])	38
Figura 4.1 - Canal utilizado nas simulações numéricas	40
Figura 4.2 - Força horizontal, vertical e momento ($dp = 0.006\text{ m}$ e $H = 0.06\text{ m}$)	42
Figura 4.3 - Força horizontal, vertical e momento ($dp = 0.003\text{ m}$ e $H = 0.06\text{ m}$)	43
Figura 4.4 - Força horizontal, vertical e momento ($dp = 0.02\text{ m}$ e $H = 0.2\text{ m}$).....	44
Figura 4.5 - Força horizontal, vertical e momento ($dp = 0.005\text{ m}$ e $H = 0.2\text{ m}$)	45
Figura 4.6 - Campo de velocidade horizontal e posição do flutuador ($dp=0.006\text{m}$ e $H = 0.06\text{m}$)..	46
Figura 4.7 - Deriva, arfagem e balanço ($dp = 0.01\text{ m}$ e $H = 0.1\text{ m}$).....	47
Figura 4.8 - Deriva, arfagem e balanço ($dp = 0.005\text{ m}$ e $H = 0.1\text{ m}$).....	48
Figura 4.9 - Deriva, arfagem e balanço ($dp = 0.004\text{ m}$ e $H = 0.04\text{ m}$).....	49

Figura 4.10 - Deriva, arfagem e balanço ($dp = 0.002\text{ m}$ e $H = 0.04\text{ m}$).....	50
Figura 4.11 - Campo de velocidade horizontal e posição do flutuador ($dp=0.004\text{ m}$ e $H = 0.04\text{ m}$).....	50
Figura 4.12 - Força horizontal e vertical ($H = 0.2\text{ m}$ e $dp = 0.025\text{ m}$).....	53
Figura 4.13 - Cabeceio e Balanço ($dp = 0.025\text{ m}$ e $H = 0.2\text{ m}$).....	53
Figura 4.14 - Guinada ($dp = 0.025\text{ m}$ e $H = 0.2\text{ m}$)	54
Figura 4.15 – Comparação dos esforços adimensionais 2D e 3D ($dp=0.005\text{ m}$ e $dp=0.025\text{ m}$).....	55
Figura 4.16 - Campo de velocidade horizontal, ondas regulares ($dp=0.025\text{ m}$).....	55
Figura 4.17 - Força horizontal e vertical ($H_s = 0.2\text{ m}$ e $dp = 0.025\text{ m}$).....	56
Figura 4.18 - Cabeceio e Balanço ($dp = 0.025\text{ m}$ e $H_s = 0.2\text{ m}$)	57
Figura 4.19 - Guinada ($dp = 0.025\text{ m}$ e $H_s = 0.2\text{ m}$)	57
Figura 4.20 - Campo de velocidade horizontal, ondas irregulares ($dp=0.025\text{ m}$).....	58
Figura 5.1 – Dimensões e sistema de coordenadas da plataforma DeepCwind.....	60
Figura 5.2 – Dimensões e sistema de coordenadas da plataforma TLP	60
Figura 5.3 – Tanque utilizado nas simulações com a plataforma DeepCwind.....	61
Figura 5.4 - Tanque utilizado nas simulações com a plataforma TLP	61
Figura 5.5 – Arfagem e balanço, plataforma DeepCwind, ondas regulares ($H = 5\text{ m}$ e $dp = 2\text{ m}$)	64
Figura 5.6 - Arfagem e balanço, plataforma DeepCwind, ondas irregulares ($H_s = 5\text{ m}$ e $dp = 2\text{ m}$)	64
Figura 5.7 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma DeepCwind (ondas regulares).....	65
Figura 5.8 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma DeepCwind (ondas irregulares).....	66
Figura 5.9 - Arfagem e balanço, plataforma TLP, ondas regulares ($H = 5\text{ m}$ e $dp = 2\text{ m}$).....	67
Figura 5.10 - Arfagem e balanço, plataforma TLP, ondas irregulares ($H_s = 5\text{ m}$ e $dp = 2\text{ m}$)	67
Figura 5.11 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma TLP (ondas regulares)	68
Figura 5.12 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma TLP (ondas irregulares) ...	68
Figura 5.13 – Arfagem e balanço das plataformas, ondas regulares ($H = 5\text{ m}$).....	69
Figura 5.14 - Arfagem e balanço das plataformas, ondas irregulares ($H_s = 5\text{ m}$).....	70

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades estruturais da plataforma DeepCwind.....	19
Tabela 2.2 - Propriedades das amarrações da plataforma DeepCwind	21
Tabela 2.3 - Propriedades estruturais da plataforma TLP	23
Tabela 2.4 - Propriedades dos tendões da plataforma TLP	24
Tabela 3.1 – Principais parâmetros utilizados no DualSPHysics	35
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados nas simulações bidimensionais.....	41
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados nas simulações tridimensionais	52
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados nas simulações das plataformas DeepCwind e TLP.....	62

Abreviaturas e Acrónimos

2D	<i>Bidimensional</i>
3D	<i>Tridimensional</i>
CFL	<i>Counrant Friedrich Levy</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DBC	<i>Dynamic boundary condition</i>
FCT	<i>Faculdade de Ciências e Tecnologia</i>
GDL	<i>Graus de Liberdade</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
SWL	<i>Still water level</i>
TLP	<i>Tension-Leg Platform</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
WCSPH	<i>Weakly compressible smoothed particle hydrodynamics</i>

Lista de Variáveis

Símbolo	Descrição	Unidades SI
A	Amplitude de onda	m
A_b	Amplitude do movimento do batedor	m
B_f	Largura da caixa flutuante 2D	m
c	Velocidade do som	ms^{-1}
C	Celeridade da onda	ms^{-1}
c_s	Constante ϵ [0.1;0.3]	(-)
d	Profundidade do oceano	m
d_p	Distância inicial entre partículas	m
f	Frequência de onda	Hz
\mathbf{f}_{ka}	Vetor da força por unidade de massa	N
f_p	Frequência de pico	Hz
F	Função genérica	(-)
F_x	Componente da força horizontal	N
F_z	Componente da força vertical	N
g	Aceleração gravítica	ms^{-2}
h	<i>smoothing length</i>	m
H	Altura de onda	m
H_s	Altura significativa	m
I	Momento de inércia	$kg\ m^2$
k	Número de onda	m^{-1}
L	Comprimento de onda	m
m, M	Massa	kg
M	Momento	$N.m$
P	Pressão	Pa
q	Distância entre partículas	(-)

\mathbf{r}	Vetor de posição	m
\mathbf{R}_0	Vetor do centro de massa do corpo flutuante	m
$S(f)$	Densidade do espectro contínuo	$m^2 s$
t	Tempo	s
T	Período de onda	s
$T_{m\acute{a}x.}$	Período máximo de simulação	s
T_p	Período de pico de onda	s
u_1	Avanço-recuo do corpo flutuante	m
u_2	Deriva do corpo flutuante	m
u_3	Arfagem do corpo flutuante	m
u_x	Componente da velocidade em x	ms^{-1}
u_z	Componente da velocidade em z	ms^{-1}
U_b	Velocidade das partículas do batedor	ms^{-1}
U_R	Correção da velocidade com absorção ativa	ms^{-1}
v	Velocidade linear	ms^{-1}
V	Volume das partículas	m^3
\mathbf{V}	Vetor velocidade da partícula	ms^{-1}
\mathbf{v}_k	Vetor da velocidade do conjunto de partículas	ms^{-1}
W	Função kernel de interpolação	(-)
\ddot{x}	Componente horizontal da aceleração	ms^{-2}
x	Coordenada horizontal	(-)
X_b	Posição inicial do batedor	m
$x_{centroide}$	Componente horizontal do centroide	m
y	Coordenada transversal	(-)
\ddot{z}	Componente vertical da aceleração	ms^{-2}
z	Coordenada vertical	(-)
$z_{centroide}$	Componente vertical do centroide	m
α	Coefficiente de viscosidade artificial	(-)
β	Constante da equação de estado	(-)

γ	Constante politrópica	(-)
δ	Parâmetro de forma	(-)
Δt_{cv}	Intervalo de tempo para a condição de CFL	<i>s</i>
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular	<i>ms⁻²</i>
μ	Coeficiente de viscosidade	(-)
ρ	Massa volúmica	<i>kg m⁻³</i>
ω	Velocidade angular	<i>rad s⁻¹</i>
θ_1	Balanço do corpo flutuante	<i>rad</i>
θ_2	Cabeceio do corpo flutuante	<i>rad</i>
θ_3	Guinada do corpo flutuante	<i>rad</i>
Ω	Vetor da velocidade angular	<i>rad s⁻¹</i>

1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se o enquadramento do trabalho onde são abordados aspetos relevantes relacionados com as plataformas semi-submersíveis DeepCwind e TLP. Também são apresentados os objetivos da dissertação e a sua respetiva metodologia. Por fim, segue-se a estrutura desta dissertação.

1.1. Enquadramento do trabalho

A energia eólica offshore é um dos mais importantes recursos de energia renovável existentes a nível mundial, podendo mesmo vir a substituir os combustíveis fósseis de forma a evitar a degradação geológica e a poluição atmosférica. Estas fontes renováveis têm como principal objetivo o desenvolvimento socioeconómico, de modo a reduzir o consumo de combustíveis fósseis permitindo assim uma maior sustentabilidade a longo prazo da economia global.

Atualmente a energia eólica offshore representa uma oportunidade relevante para Portugal e para a Europa. Um dos grandes problemas no mundo das energias renováveis encontra-se no crescimento das áreas urbanas visto que dificulta a instalação das turbinas eólicas nas mesmas. De modo a solucionar este problema, verificou-se a necessidade de instalar este tipo de dispositivos distante das zonas urbanas, nomeadamente no mar. Já desde os anos 90 que se constroem turbinas eólicas num meio aquático ficando dois problemas por resolver, as estruturas de suporte e o transporte de energia para a terra. Relativamente às estruturas de suporte, ainda é necessário estudar a sua hidrodinâmica e estabelecer condições ótimas para a sua estabilidade e sobrevivência. Portanto, neste projeto é pretendido estudar numericamente o comportamento e a sobrevivência das plataformas semi-submersíveis DeepCwind e TLP (Tension-Leg platform) para suporte de turbinas eólicas offshore.

O sistema de suporte TLP teve origem na década de 1980, tendo como objetivo a produção de plataformas que permitissem a estabilidade de uma turbina eólica no mar. Esta plataforma semi-submersível consiste num conjunto de três colunas cheias de ar conectadas entre si e instaladas no fundo do mar de modo que seja possível suportar uma turbina eólica. Por outro lado, DeepCwind

consiste num grupo de investigadores que visam o desenvolvimento eólico offshore flutuante nos Estados Unidos [1]. O seu principal objetivo consiste na caracterização do ambiente marítimo de modo que fosse possível instalar turbinas eólicas em águas profundas e posteriormente, garantir segurança e a navegação no local onde as turbinas fossem instaladas.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste em estudar numericamente o comportamento e a sobrevivência das plataformas semi-submersíveis DeepCwind e TLP para suporte de turbinas eólicas offshore. As simulações numéricas realizaram-se utilizando o modelo DualSPHysics.

Para alcançar este objetivo foi necessário:

- i) Testar o modelo numérico usando resultados numéricos existentes na literatura;
- ii) Acoplar no modelo numérico um gerador de ondas que permita reproduzir as características de agitação regular e irregular, e assim estudar a interação onda-corpo flutuante;
- iii) Simular o movimento das plataformas nos seus seis graus de liberdade por forma a estudar seu comportamento.

Este trabalho permitiu ainda ao autor aumentar a sua competência no âmbito da simulação numérica e no tratamento e representação gráfica de escoamentos, nomeadamente utilização do código *Paraview*.

1.3. Metodologia

A Figura (1.1) representa sequencialmente as tarefas realizadas para realizar uma simulação numérica.

Inicialmente, é necessário reproduzir a geometria das plataformas DeepCwind e TLP e introduzir no código numérico DualSPHysics as condições de agitação regular e irregular. Devido à complexidade geométrica das plataformas utiliza-se o programa *SolidWorks* para a construção do domínio computacional. As geometrias são posteriormente exportadas em formato *stl* para serem discretizadas no DualSPHysics, onde se definem as condições fronteira a partir de um ficheiro XML.

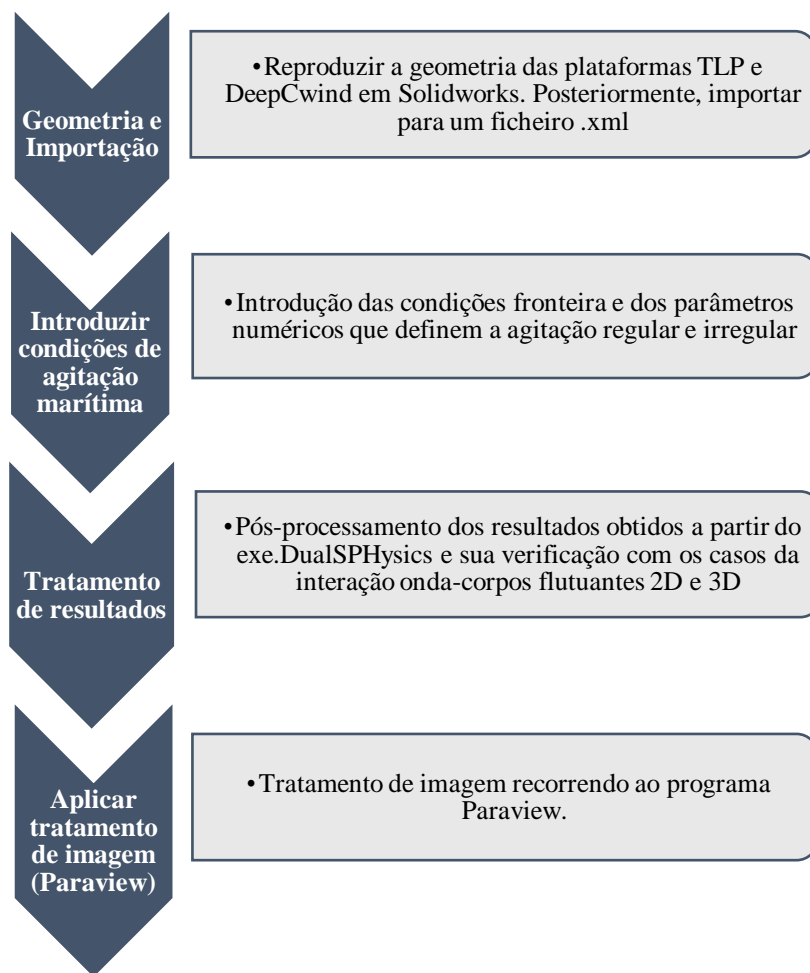


Figura 1.1 - Metodologia de otimização

Posteriormente, efetua-se a recolha dos resultados obtidos das simulações a partir do *exe.DualSPHysics* necessários para a verificação do caso 2D. Para tal, os resultados numéricos são em comparação com o artigo [2]. Também são recolhidos os resultados numéricos dos casos 3D para uma agitação regular e irregular, de modo a garantir que o *DualSPHysics* é viável e preciso para o estudo da interação onda-plataformas offshore.

Finalmente, efetua-se o pós-processamento dos resultados do *DualSPHysics* utilizando o programa *Paraview* de modo a determinar as velocidades máximas e mínimas das partículas do fluido.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida num conjunto de 6 capítulos, aos quais se acrescentam os anexos e as referências bibliográficas.

1. **Capítulo:** É apresentado o enquadramento do trabalho, assim como os objetivos definidos e as metodologias utilizadas para a concretização da dissertação;
2. **Capítulo:** É apresentada uma revisão bibliográfica das teorias utilizadas para a propagação de ondas regulares e irregulares, assim como as suas principais características e aproximações definidas. Também são apresentados os espectros teóricos de onda a ter em consideração para o tratamento dos resultados. Posteriormente, é apresentada o estado de arte das plataformas semi-submersíveis *DeepCwind* e *TLP*, assim como as respetivas geometrias e o sistema de coordenadas que as define (seis graus de liberdade);
3. **Capítulo:** É descrito o modelo numérico e os seus respetivos parâmetros utilizados nas simulações. Também são definidas as condições fronteira do modelo e esquemas de integração numéricos utilizados;

4. **Capítulo:** É apresentada a verificação do modelo DualSPHysics para o estudo da interação de onda-corpo flutuante 2D. Também são feitos testes para casos 3D para uma agitação regular e irregular;
5. **Capítulo:** São estudadas as estruturas DeepCwind e TLP em condições reais de simulação, tendo em vista a cinemática das plataformas para uma interação com uma agitação marítima regular e irregular.
6. **Capítulo:** São apresentadas as conclusões gerais do trabalho realizado no âmbito das simulações bidimensionais e tridimensionais para a agitação regular e irregular. Também são feitas as conclusões referentes ao estudo realizado do comportamento das plataformas offshore.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo, inicialmente, efetua-se uma revisão bibliográfica à teoria regular de 1ª e 2ª ordem de Stokes. Posteriormente, é apresentada a teoria irregular e seus respectivos espectros de energia.

Na parte final do capítulo apresenta-se o estado de arte das plataformas DeepCwind e TLP e suas respectivas geometrias descritas por outros autores com relevância para este estudo.

2.1. Propagação de ondas regulares e irregulares

Nesta seção, apresentam-se os conceitos mais importantes da teoria linear das ondas (teoria de Airy) e a teoria de 2ª ordem de Stokes, estas que assumem ondas com características bem definidas e que não variam no tempo e no espaço. Também é apresentada a teoria de ondas irregulares. Existem um grande número de teorias de propagação de ondas, contudo no âmbito deste trabalho, as duas teorias anteriores são suficientes.

2.1.1. Teoria linear de ondas (Stokes 1ª ordem)

A teoria de Airy, também denominada como teoria linear das ondas, foi proposta por George Airy, no século XIX, e consiste no primeiro e mais simples modelo matemático de representação de ondas. Este modelo descreve eficazmente as propriedades cinemáticas e dinâmicas das ondas, permitindo obter resultados de aplicações sem ter de recorrer a métodos de cálculo complexos.

Estando a teoria linear de ondas regulares amplamente documentada na bibliográfica, [3], [4] e [5], assim como a teoria de ondas irregulares em [5], opta-se aqui por apenas explicitar as expressões mais importantes e com implicações diretas neste estudo.

Na teoria linear assume-se que o fluido é incompressível, invíscido e homogêneo e o escoamento é irrotacional. Como condições de fronteira admite-se que a altura de onda, H , é constante e pequena em comparação com o seu comprimento, L , e com a profundidade, d .

A elevação da superfície oceânica consiste num perfil de onda sinusoidal e a equação que a descreve em função do tempo (t) e da posição horizontal (x) é dada por:

$$\eta = A \cos (kx - \omega t) \quad (2.1)$$

onde A é a amplitude de onda, com frequência angular, ω , dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

T é o período de onda e k corresponde ao número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.3)$$

A velocidade de propagação de onda designa-se por celeridade e é definida pela seguinte equação, C :

$$C = \frac{g}{\omega} \tanh (kd) = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh (kd)} \quad (2.4)$$

Em que g é a gravidade.

A Equação (2.4) permite mostrar que ondas com diferentes comprimentos de onda têm diferentes velocidades de propagação, ou seja, o meio é dispersivo.

A Figura (2.1) representa os perfis verticais de velocidade, u_z , na crista e na cava de uma onda progressiva ao longo de um comprimento de onda. Os campos de velocidade descritos um perfil linear e são obtidos derivando as equações do potencial de velocidade.

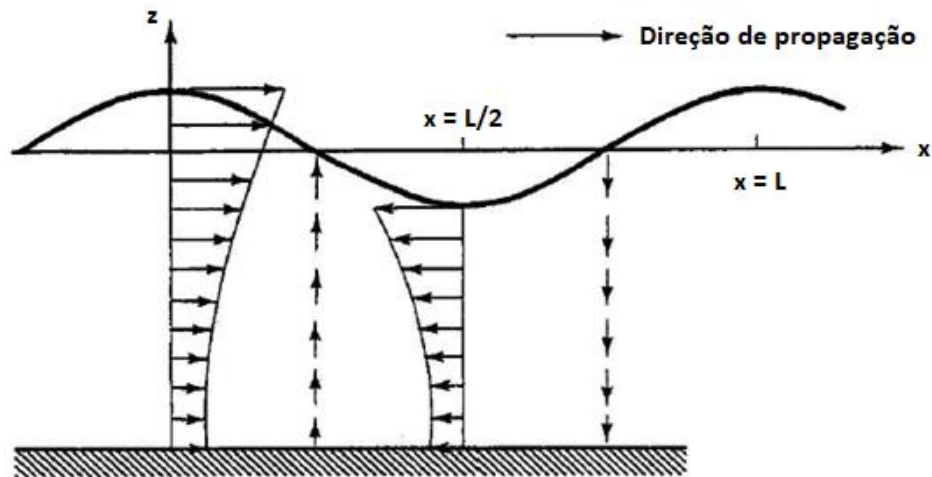


Figura 2.1 - Perfis de velocidade da onda progressiva em relação ao comprimento de onda [3]

As ondas gravitacionais também podem ser classificadas pela profundidade da água na qual se propagam. As seguintes classificações são feitas de acordo com a profundidade relativa, d/L , como se verifica na Figura (2.2).

<ul style="list-style-type: none"> • Profundidades relativas inferiores a 0.05; • A resistência do fundo do oceano faz com que as ondas reduzam a sua velocidade de propagação ao se aproximar da zona costeira; • Comprimento de onda diminui. 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidades relativas compreendidas entre 0.5 e 0.05; • O movimento das partículas líquidas apresenta uma forma elíptica, visto que a profundidade influencia a trajetória das mesmas. 	<ul style="list-style-type: none"> • A profundidade relativa não tem influência; • Movimento das partículas circular/orbital; • Pouca dispersão de energia.
Águas pouco profundas	Águas intermédias	Águas profundas

Figura 2.2 – Características de águas pouco profundas, intermédias e profundas

Para este trabalho, a profundidade relativa, d/L , é importante para caracterizar a propagação das ondas superior a 0.5, característico de uma zona de águas profundas onde o comprimento de onda, L , é definido da seguinte forma [3]:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.5)$$

Para águas profundas ($\frac{d}{L} > 0.5$), a expressão (2.6) simplifica-se,

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega} \quad (2.6)$$

Também para profundidades infinitas interessa descrever o campo de velocidades sobre a onda. O campo de velocidades em ordem às direções x e z , horizontal e vertical respetivamente, é descrito pelas seguintes equações:

$$u_x = \frac{2\pi H}{T} \frac{1}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin(\omega t - kx) \quad (2.7)$$

$$u_z = \frac{2\pi H}{T} \frac{1}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos(\omega t - kx) \quad (2.8)$$

A teoria linear deixa de ser válida para o estudo de casos em águas pouco profundas $H/L < 0.05$. Esta limitação pode ser resolvida recorrendo a teorias de ondas de ordem superior.

2.1.2. Teoria de 2ª ordem de Stokes

No âmbito deste trabalho, para descrever a elevação da superfície livre e o campo de escoamento é necessário recorrer à teoria de 2ª ordem de Stokes, tendo em consideração a relação $H/L < 0.125$, [4]. Esta teoria é aplicável para os casos de estudo da verificação numérica e para os casos de estudo da estabilidade das plataformas semi-submersíveis.

De acordo com esta teoria, a expressão que permite calcular a elevação da superfície livre é apresentada pela Equação (2.9), onde o primeiro termo corresponde à onda de Airy da teoria linear de ondas e o segundo termo corresponde à aproximação de segunda ordem de Stokes. A relação de dispersão representada pela Equação (2.4) ainda é válida para a 2ª ordem de Stokes.

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \left(\frac{\cosh(kd)[2 + \cosh(2kd)]}{\sinh^3(kd)} \right) \cos[2(kx - \omega t)] \quad (2.9)$$

onde L é definido da seguinte forma:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.10)$$

As componentes horizontal e vertical da velocidade são, respetivamente:

$$u_x = -\frac{H}{2} \frac{k g \cosh[k(z+d)]}{\omega \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3(\pi H)^2}{4TL} \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos[2(kx - \omega t)] \quad (2.11)$$

$$u_z = -\frac{H}{2} \frac{k g \sinh[k(z+d)]}{\omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3(\pi H)^2}{4TL} \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (2.12)$$

Para ordens superiores à 2ª aproximação da teoria de Stokes, a celeridade e o comprimento de onda dependem da altura de onda, pelo que, para um maior valor da altura de onda, a celeridade e o comprimento também são respetivamente maiores.

Contudo, os casos que estão descritos nos capítulos 4 e 5, nomeadamente, casos de estudo para a verificação numérica e os casos de estudo das plataformas DeepCwind e TLP (Tension-Leg Platform), apresentam um perfil de ondas harmônicas que incide no domínio dos valores correspondentes à 2ª ordem da teoria de Stokes representados no Gráfico (2.3).

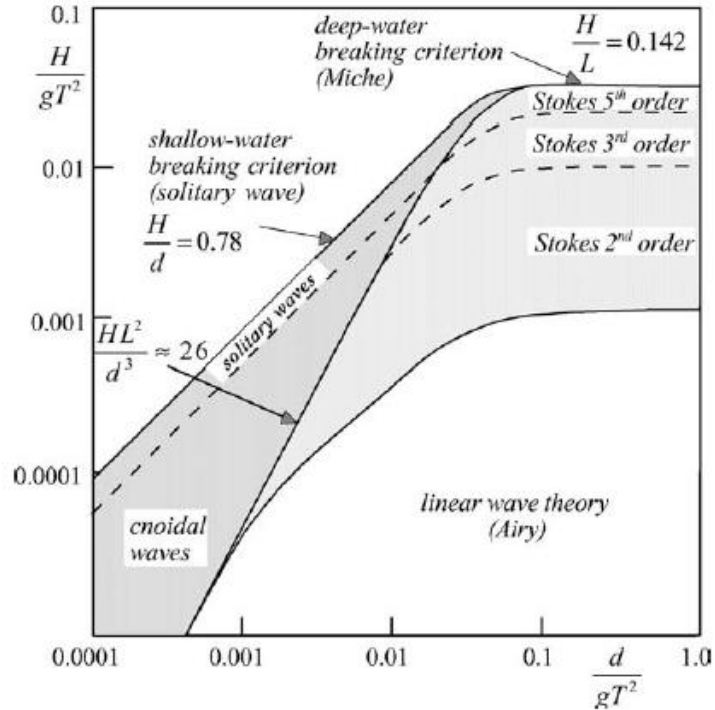


Figura 2.3 - Intervalos de aplicabilidade das várias teorias de onda [5]

2.1.3. Teoria irregular

O termo ondas irregulares é usado para descrever estados naturais do mar que apresentam características de onda com grande complexidade. Ao observar a superfície oceânica verifica-se que a superfície livre não é regular. Embora as ondas possam ser identificadas individualmente, existe uma variabilidade significativa tanto na altura e como no período.

Efetivamente a superfície oceânica consiste numa combinação de um grande número de ondas de diferentes frequências e direções de propagação. Estas componentes foram geradas pela ação do vento irregular.

Na Figura (2.4) exemplifica-se como a sobreposição de várias componentes harmônicas com diferentes amplitudes, frequências e direções de propagação origina um estado natural do mar.

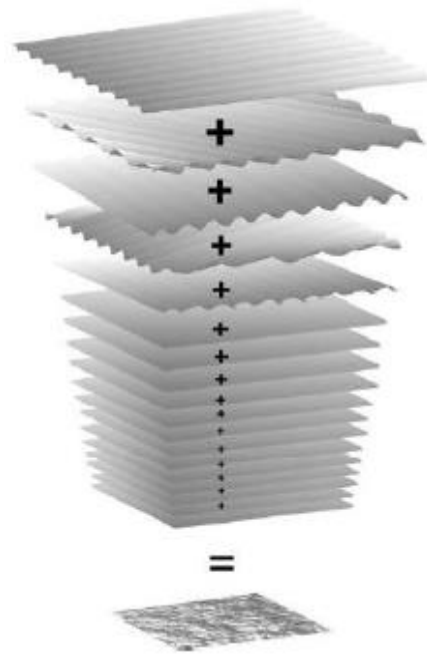


Figura 2.4 - Combinação de diferentes ondas com sentidos aleatórios e não periódicas [5]

É comum modelar o estado natural do mar recorrendo a análises espectrais. Dois dos modelos utilizados para definir o estado do mar são o espectro de Pierson-Moskowitz e o Espectro de JONSWAP. Estes espectros correspondem à distribuição de energia na frequência.

O espectro de Pierson-Moskowitz é aplicado para casos onde a interação do vento com a superfície oceânica não altera significativamente as suas características, nomeadamente a velocidade de propagação da onda e a sua direção. Estando perante um sistema em equilíbrio, a expressão do espectro de Pierson-Moskowitz obtém-se da seguinte forma [5]:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \quad (3.13)$$

onde,

α – Representa a constante de Phillips onde normalmente o seu valor é 0.0081;

f_p – Representa a frequência de pico (Hz).

O espectro de JONSWAP foi desenvolvido tendo como base o estudo de dados de registos de onda obtidos no mar do Norte, sendo este mais utilizado para situações de zonas costeiras. Este está representado pela Figura (2.5) e é utilizado para a criação de ondas irregulares representando

estados do mar em desenvolvimento onde a geração de ondas se processa numa zona onde o *fetch* é limitado [5].

Este espectro empírico de JONSWAP representado na Figura (2.5) é dado por:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \beta^{\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-f_p}{\delta f_p} \right)^2 \right]} \quad (3.14)$$

onde,

β – Parâmetro com valor usual de 3.3 (varia entre 1 e 7);

FE – Representa o comprimento do *fetch*;

U_{10} – Representa a velocidade do vento dez metros acima do SWL;

δ – Parâmetro de forma que varia entre:

$$\delta = \begin{cases} 0.07 & , \quad f \leq f_p \\ 0.09 & , \quad f \geq f_p \end{cases} \quad (3.15)$$

f_p – Representa a frequência de pico (Hz), sendo calculado pela seguinte forma:

$$f_p = 3.5 \left(\frac{g^2 FE}{U_{10}^3} \right)^{-0.33} \quad (3.16)$$

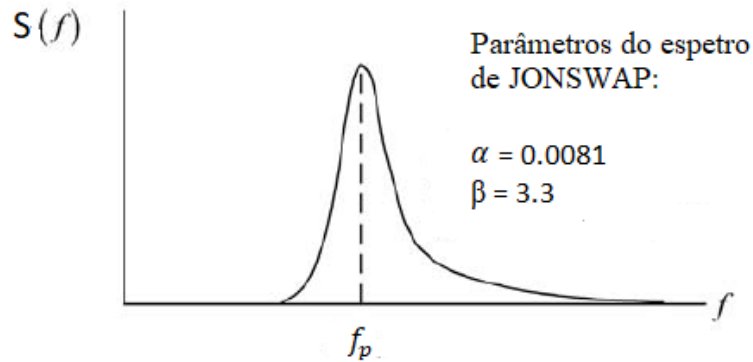


Figura 2.5 - Espectro empírico de JONSWAP (adaptado: [5])

2.2. Estado de arte das plataformas semi-submersíveis

As opções de localização da instalação das plataformas offshore são um fator a ter em conta atualmente visto existirem locais de vento mais viáveis e com menos impacto visual em termos estéticos para a produção de energia. As principais vantagens da instalação da energia eólica no mar são as seguintes:

- O vento tem intensidade e direção pouco variável;
- Camada limite completamente desenvolvida não perturbada no mar, enquanto que na terra a camada limite é extremamente perturbada;
- Recurso energético mais rico;
- O tamanho da estrutura eólica não é limitado por restrições de logística;
- Caso as turbinas sejam instaladas a uma distância considerável da costa, problemas sonoros e visuais podem ser evitados;
- A possibilidade de instalar estes dispositivos no mar contribui para a preservação de zonas territoriais.

Por outro lado, a instalação destes dispositivos no mar implica investimentos adicionais devido aos custos associados às componentes que suportam as turbinas eólicas, ao deslocamento e à instalação da estrutura. Como os dispositivos offshore são menos acessíveis e suportam cargas hidrodinâmicas das correntes marítimas, o aumento do custo de operação e de manutenção também são fatores a ter em consideração.

A energia eólica representa uma energia inesgotável que veio possibilitar a produção de energia considerada limpa, sendo considerada como uma fonte de energia alternativa aos combustíveis fósseis. A partir dos anos 90, a empresa Statoil em colaboração com a Masdar, uma empresa com sede nos Emirados Árabes Unidos, construíram na Noruega turbinas eólicas de modo a serem instaladas na Escócia. Estas turbinas foram instaladas em plataformas cuja sua profundidade ronda os 78 metros, podendo ser manuseadas a profundidades que vão até aos 792 metros, segundo a fonte [6].

A Figura (2.6) representa a transição do modo de instalação das turbinas onshore para as turbinas offshore conforme a profundidade do canal pretendido.

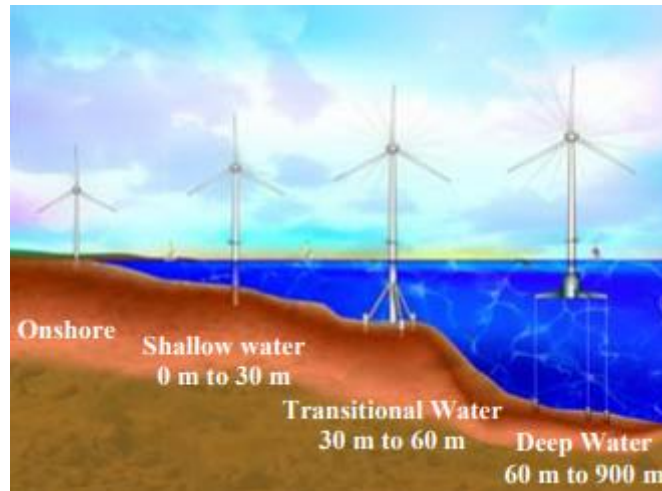


Figura 2.6 - Modo de instalação das plataformas TLP em relação à profundidade [7]

As plataformas não eram tão desenvolvidas como as atuais devido ao reduzido conhecimento e falta de estudo relativamente à área das plataformas semi-submersíveis. Contudo, a tecnologia utilizada pelas indústrias de petróleo e de gás existentes foram fatores essenciais para a implementação das estruturas eólicas offshore.

Para estudar o comportamento de dispositivos que suportam turbinas eólicas offshore, neste trabalho são propostos dois tipos de plataformas distintas, as DeepCwind e as TLP (Tension-Leg Platform) representadas pela Figura (2.7). Estas são diferentes entre si devido à sua geometria e aos seus elementos de amarração. Portanto, no decorrer da dissertação, ambas irão ser estudadas relativamente à sua cinemática para diferentes situações de agitação marítima.



Figura 2.7 - Representação das plataformas offshore TLP (esquerda) e DeepCwind (direita)(adaptado:[6])

A maior parte das centrais eólicas offshore existentes pelo mundo estão instaladas em águas pouco profundas. Portanto, o estudo das plataformas offshore desenvolvidas nesta dissertação têm em vista a instalação das mesmas em águas mais profundas de modo a verificar o seu comportamento e sobrevivência para agitações regulares e irregulares.

2.3. Descrição da geometria das plataformas DeepCwind e TLP

No âmbito deste trabalho interessa utilizar a geometria das plataformas DeepCwind e TLP descrita em [1], [8], [9], [10] [11] e para estudar numericamente a estabilidade das plataformas ao interagirem com a agitação marítima.

Nesta seção são apresentadas as propriedades geométricas e estruturais da plataforma DeepCwind representada na Figura (2.8). Esta consiste numa estrutura semi-submersível, com uma altura aproximadamente de 32 m, constituída por um conjunto de componentes que garantem estabilidade à torre instalada na coluna principal da plataforma.

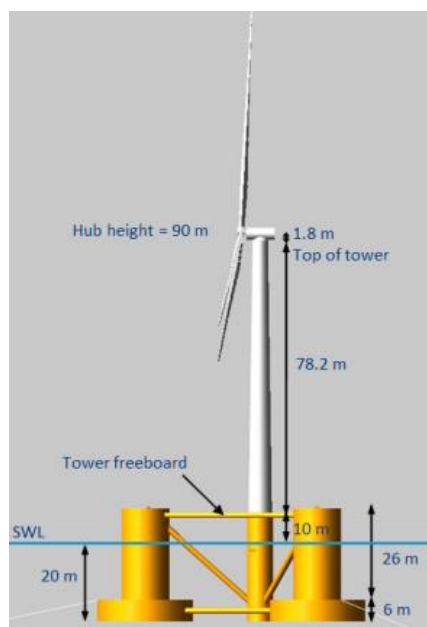


Figura 2.8 - Sistema (aerogerador, torre e plataforma flutuante) em escala real [10]

Existem diversos projetos relativos à estrutura TLP que são utilizados para diferentes tarefas offshore cuja principal função será suportar turbinas eólicas. A estrutura utilizada nesta dissertação consiste num modelo usual para o estudo no campo das energias renováveis representada pela Figura (2.9).



Figura 2.9 - Plataforma offshore TLP acoplada a uma turbina eólica (adaptado: [11])

2.3.1 Geometria da plataforma DeepCwind e suas componentes

As principais componentes que definem a plataforma flutuante DeepCwind consistem numa coluna principal onde a torre eólica é instalada aproximadamente a 10 m acima da SWL e por três colunas estabilizadoras que estão interligadas entre si a partir de ligações cilíndricas. Estas ligações garantem a estabilidade necessária para promover a flutuabilidade do sistema (plataforma, torre e aerogerador).

O esboço da plataforma e as suas propriedades estruturais são representadas pela Figura (2.10) e pela Tabela (2.1), respetivamente. Estes dados podem ser adquiridos a partir das fontes [1] e [9].

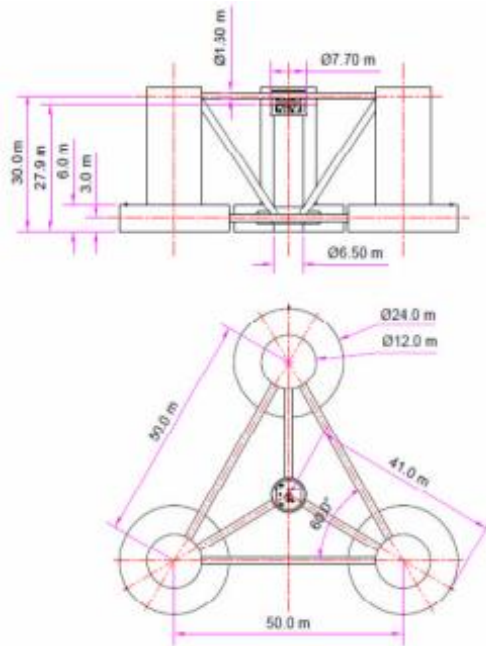


Figura 2.10 - Esboço da plataforma DeepCwind (retirado de [9])

O lastro que é incluído na massa da plataforma corresponde à combinação da massa do aerogerador (5 MW), da torre, da plataforma flutuante (incluindo a água presente nas colunas estabilizadoras) e das respectivas amarrações existentes na parte inferior da plataforma flutuante.

Tabela 2.1 - Propriedades estruturais da plataforma DeepCwind (retirado de [9])

Platform mass, including ballast	1.3473E+7 kg
CM location below SWL	13.46 m
Platform Roll inercia (I_{xx})	6.827E+9 kg.m ²
Platform Pitch inercia (I_{yy})	6.827E+9 kg.m ²
Platform Yaw inercia (I_{zz})	1.226E+10 kg.m ²

As propriedades estruturais e de amarração das plataformas estão representadas em inglês, uma vez que a sua tradução dá um sentido diferente às propriedades descritas.

As Figuras (2.8) e (2.11) apresentam o conjunto torre, aerogerador e plataforma flutuante instalados entre si e os principais componentes que definem a plataforma, respetivamente.

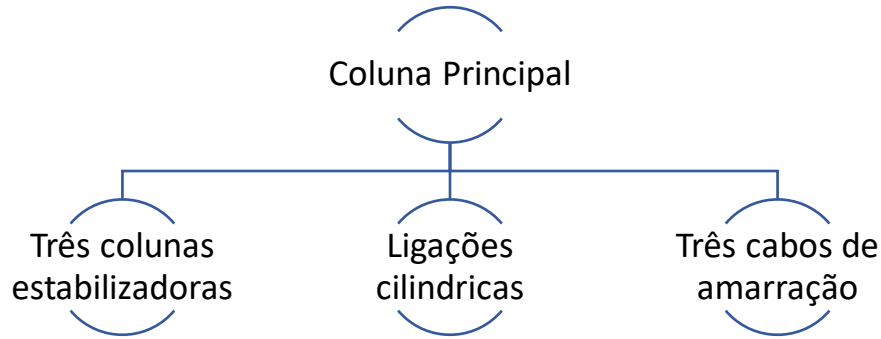


Figura 2.11 - Principais componentes que definem a plataforma DeepCwind

As colunas estabilizadoras são compostas por um patamar superior e um patamar inferior que no seu interior são compostas por água ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$) na sua base até um determinado nível, sendo este 5.1078m para o patamar inferior e 7.83m para o patamar superior.

O conjunto das ligações cilíndricas presentes na plataforma são instaladas pela seguinte forma:

- Dois conjuntos de três ligações cilíndricas de modo a que as colunas estabilizadoras estejam interligadas entre si e que formem um triângulo;
- Dois conjuntos de três ligações cilíndricas interligando as colunas estabilizadoras com a coluna principal;
- Três ligações cilíndricas que se encontram cruzadas entre a parte inferior da coluna principal com a parte superior das colunas estabilizadoras.

Na Figura (2.12) está representado o sistema de componentes de amarração presentes na plataforma flutuante DeepCwind em relação à direção do vento e da propagação de ondas introduzida no sistema. Embora fora do âmbito deste trabalho, a tecnologia dos sistemas de amarração necessita de um estudo pertinente [10].

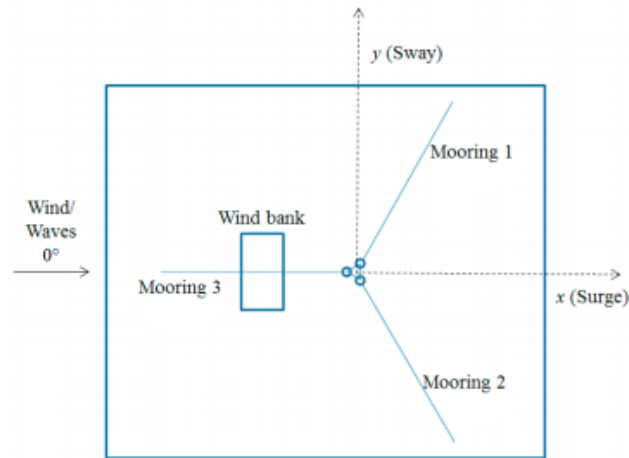


Figura 2.12 - Sistema de amarração na plataforma DeepCwind [10]

As propriedades das amarrações representadas na Tabela (2.2) podem ser consultadas em [10].

Tabela 2.2 - Propriedades das amarrações da plataforma DeepCwind

Number of mooring lines	3
Angle between adjacent lines	120°
Depth to Anchors below SWL (water depth)	200 m
Depth to Fairleads below SWL	14 m
Radius to Anchors from Platform Centerline	837.6 m
Radius to Fairleads from Platform Centerline	40.868 m
Unstretched Mooring Line Length	835.5 m
Mooring Line Diameter	0.0766 m
Equivalent Mooring Line Mass Density	113.35 kg/m
Equivalent Mooring Line Extensional Stiffness	7.536E+8 N

2.3.2 Geometria da plataforma TLP e suas componentes

O segundo caso de estudo consiste numa plataforma semi-submersível TLP (Tension-Leg Platform), cuja sua principal função é garantir a estabilidade quando acoplada a uma torre eólica na sua coluna principal. Para tal, é necessário realizar um acoplamento correto entre os componentes aerodinâmicos da estrutura e as propriedades hidrodinâmicas impostas pelas condições de agitação marítima definidas.

Em relação à geometria que irá ser estudada para a plataforma TLP, esta pode ser observada na Figura (2.13) à escala real [9].

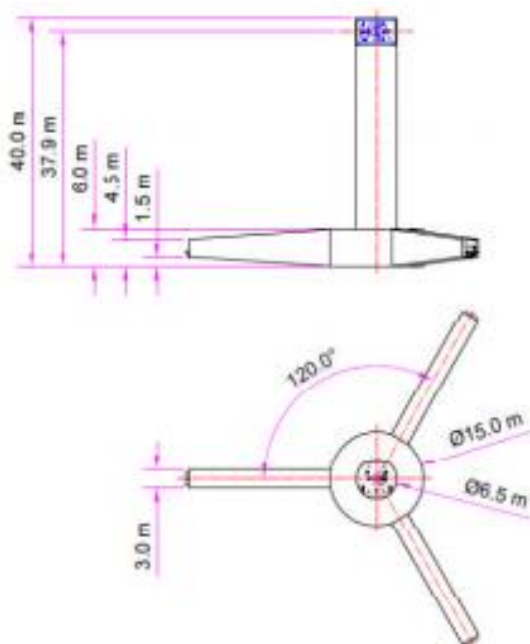


Figura 2.13 - Relações geométricas para uma plataforma TLP (retirado de [9])

As propriedades estruturais da plataforma estão representadas na Tabela (2.3). Estes dados podem ser adquiridos a partir das fontes [1] e [9].

Tabela 2.3 - Propriedades estruturais da plataforma TLP (retirado de [9])

Platform Mass	8.60041E+6 <i>kg</i>
Platform Diameter	15 <i>m</i>
Center of Mass (Platform) from SWL	40.612 <i>m</i>
Roll Gyration - k_{xx} (<i>m</i>)	52,61
Pitch Gyration - k_{yy} (<i>m</i>)	52,69
Yaw Gyration - k_{zz} (<i>m</i>)	9.40
Coefficient of Drag	0.6

Para além do acoplamento entre a estrutura de suporte TLP com a torre eólica, a plataforma TLP também promove uma flutuabilidade estável através da implementação de componentes de amarração, representadas pela Figura (2.14). O sistema de amarração presente no caso de estudo consiste num conjunto de tendões ancorados ao fundo do oceano de modo a restringir o deslocamento e a oscilação da estrutura de suporte ao interagir com a agitação marítima, sendo que, este sistema é definido para um conjunto de 6 GDL em relação ao centroide da plataforma.

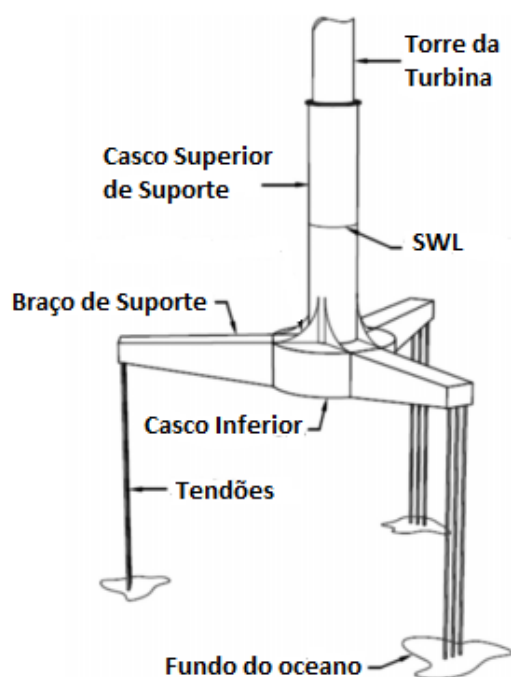


Figura 2.14 - Componentes da plataforma TLP (adaptado: [11])

O casco principal (superior) suporta a torre da turbina eólica, os três braços distanciados entre si por 120° em relação ao casco inferior sustentam os tendões rígidos que se encontram ancorados ao fundo oceânico, de modo a restringir o movimento do sistema (torre, plataforma e aerogerador).

As propriedades dos tendões que suportam a plataforma estão representadas na Tabela (2.4) e podem ser consultadas em Estes dados podem ser adquiridos a partir das fontes [1] e [9].

Tabela 2.4 - Propriedades dos tendões da plataforma TLP (retirado de [9])

Anchor Radius	30 <i>m</i>
Anchor Depth	200 <i>m</i>
Radius of Fairlead	30 <i>m</i>
Tendon Porch Depth	28.5 <i>m</i>
Unstretched Tendon Lenght	171.39 <i>m</i>
Tendon Diameter	0.6 <i>m</i>

2.3.3 Sistemas de Coordenadas

Para caracterizar o movimento das plataformas introduz-se um sistema de coordenadas necessárias para a simulação e, posteriormente, para a análise da estrutura offshore DeepCwind e TLP. Para este sistema é crucial definir os seus seis graus de liberdade devido à interação com a agitação marítima.

O conjunto de eixos ortogonais do referencial inercial é definido em três dimensões, sendo estes eixos representados por X , Y e Z . A partir da representação do esboço das plataformas flutuantes nas Figuras (2.10) e (2.13), o eixo $+X$ representa a direção do eixo da coordenada X positiva, aplicando-se de igual forma para o eixo $+Y$, sendo que o plano XY representado define o SWL. Em relação ao eixo $+Z$, este é positivo na direção vertical e no sentido oposto à aceleração gravítica. As ondas originadas a partir de um batedor para as simulações propagam-se em relação ao eixo $+X$.

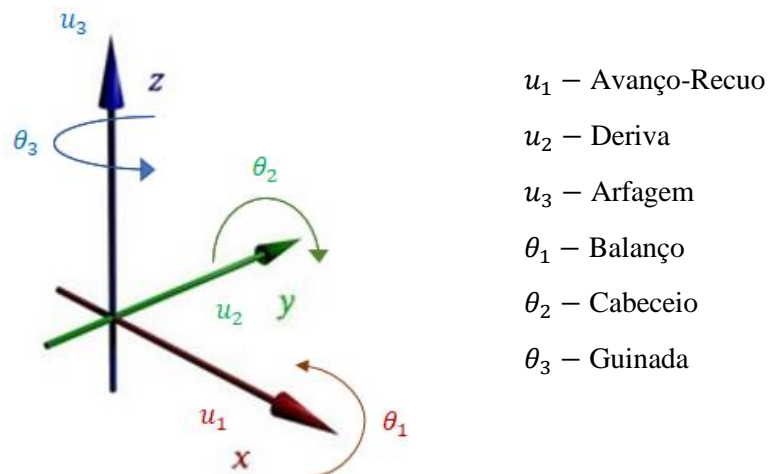


Figura 2.15 - Representação do eixo referente aos 6 graus de liberdade do corpo flutuante

A Figura (2.15) apresenta o conjunto dos seis graus de liberdade que representam o sistema de coordenadas para o estudo da plataforma semi-submersível DeepCwind (*Avanço-Recuo, deriva, arfagem, balanço, cabeceio e guinada*). Este sistema de coordenadas está localizado no centroide das plataformas de suporte.

No âmbito deste trabalho, os deslocamentos u_1 e u_2 e as rotações θ_1 e θ_2 são semelhantes devido à geometria das plataformas DeepCwind e TLP ser simétricas. Pelo que, esta simplificação é considerada na simulação e no tratamento dos resultados da interação onda-plataformas flutuantes.

3. Modelo Numérico

Neste capítulo descreve-se o modelo numérico utilizado nesta dissertação. Inicialmente apresenta-se as equações que geram a mecânica dos fluidos no formalismo SPH. Posteriormente são apresentadas as condições de fronteira e os parâmetros numéricos utilizados no pré-processamento e no pós-processamento.

3.1. Método SPH

No método SPH o domínio computacional é discretizado por um conjunto de partículas. A interação entre estas partículas é determinada por uma função Kernel de interpolação, que define o domínio de influência das partículas vizinhas [12] e [13]. A Figura (3.1) representa um exemplo do domínio de influência de uma dada partícula a .

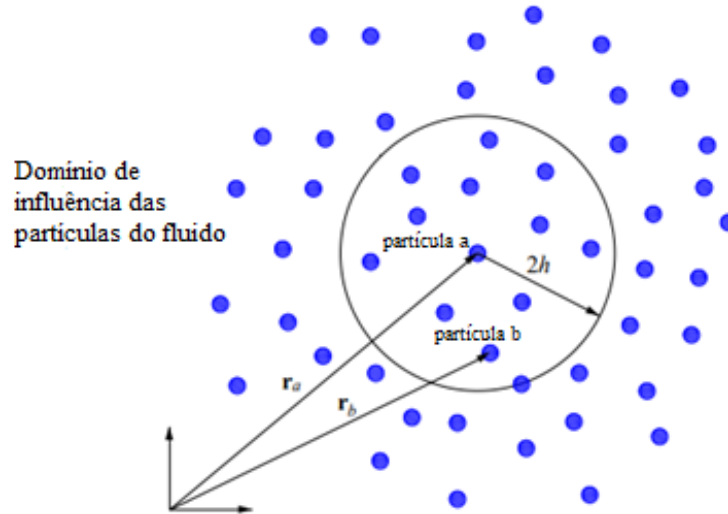


Figura 3.1 - Domínio de influência do kernel de interpolação (adaptado: [14])

Na forma discreta uma propriedade qualquer, F , pode ser aproximada da seguinte forma [15]:

$$F(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b F(\mathbf{r}_b) W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \Delta V_b \quad (3.1)$$

onde W é o kernel de interpolação, h é o comprimento característico (*smoothing length*), r' representa a distância onde F é definida e ΔV representa o volume das partículas, dada por:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.2)$$

onde m é a massa e ρ é a massa volúmica das partículas.

3.1.1 Kernel de interpolação

A eficiência do método SPH depende fortemente do tipo de kernel de interpolação uma vez que determina a forma de interação entre partículas. Os kernels são normalmente expressos em função da distância adimensional entre partículas, $q = \mathbf{r}/h$, onde $\mathbf{r} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$ representa a distância entre duas partículas a e b . Os kernels são compostos por polinómios de diferentes ordens, sendo que quanto maior for a ordem, maior é esforço computacional e os resultados obtidos são mais precisos [15].

O código DualSPHysics tem implementado dois tipos de kernel. No entanto, um dos modelos mais consensuais e comuns a ser utilizado nas simulações SPH consiste no kernel *Wendland* [16] e [17]. O kernel *Wendland* permite obter resultados precisos relativamente aos kernels de ordem inferior, sendo definido da seguinte forma [16]:

$$W(q, h) = \frac{1}{h^d} \beta \begin{cases} (2 - q)^4(1 + 2q) & 0 \leq q \leq 2 \\ 0 & q > 2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde d é a dimensão do domínio e β é igual a $7/(64\pi)$ para casos 2D.

3.1.2 Equação da continuidade

No código DualSPHysics, o fluido é tratado como fracamente compressível (*weakly compressible smoothed particle hydrodynamics* – WSPH), isto é, a massa volúmica das partículas sofre pequenas alterações ao longo da simulação. De modo a calcular as flutuações de densidade é necessário recorrer à equação da conservação de massa, no formalismo SPH [18]:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \nabla_a W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (3.4)$$

onde ρ_a é a massa volúmica da partícula a e \mathbf{v}_k representa o vetor da velocidade das partículas (a variável k está associada às partículas a e b presentes no suporte de kernel).

3.1.3 Equação de estado

A equação de estado que relaciona a pressão no fluido com a massa volúmica de uma partícula a é dada da seguinte forma [19]:

$$P_a = B \left[\left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3.5)$$

onde $\gamma = 7$ é a constante politrópica, $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ é a massa volúmica de referência da água e a constante $B = c^2 \rho_0 / \gamma$, sendo que c é a velocidade do som na água que pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$c = \sqrt{\left. \frac{dP}{d\rho} \right|_{\rho=\rho_0}} \quad (3.6)$$

3.1.4 Equação da conservação da quantidade de movimento

O balanço da quantidade de movimento no formalismo SPH é dado por:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) + \mathbf{g} \quad (3.7)$$

onde \mathbf{v}_k , P_k e ρ_k representam, respetivamente, o vetor velocidade, a pressão e a massa volúmica de uma dada partícula k .

O modelo da viscosidade artificial, Π , proposto por [20], é o modelo mais usado para descrever os termos viscosos da equação do balanço da quantidade de movimento. O termo de viscosidade artificial, Π_{ab} , é dado por:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) < 0 \\ 0 & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) > 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

onde $\bar{\rho}_{ab} = (\rho_a + \rho_b)/2$ representa a média das massas volúmicas referentes às partículas a e b , $\bar{c}_{ab} = (c_a + c_b)/2$ representa a média da velocidade do som. O coeficiente da dissipação viscosa toma valores $\alpha = 0.01$ para estudos referentes a propagações de onda em canais [15].

O termo, μ_{ab} , representa a viscosidade e é calculada da seguinte forma:

$$\mu_{ab} = \frac{h(\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)}{(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)^2 + \eta^2} \quad (3.9)$$

onde $\eta^2 = 0.01h^2$ é um coeficiente de dissipação. Normalmente necessita ser ajustado de modo a introduzir a dissipação adequada para a simulação pretendida.

3.2. Condições de fronteira do modelo SPH

No DualSPHysics, as condições de fronteira não aparecem de forma natural, isto é, somente as partículas localizadas dentro do domínio interagem com as partículas da fronteira sólida sem qualquer interação com o meio exterior. Portanto, a fronteira sólida é descrita por um conjunto de partículas semelhantes às partículas de fluido.

Para evitar problemas de fronteira originados devido à interação entre as partículas de fronteira e as partículas de fluido, o DualSPHysics apresenta duas soluções que consistem na origem de partículas virtuais que caracterizam as condições de fronteira, como é descrito nos próximos subcapítulos.

A condição de fronteira dinâmica (*dynamic boundary condition* - DBC) é o método padrão fornecido pelo DualSPHysics [21]. A vantagem deste método é que o código utiliza as mesmas equações que as partículas do fluido. Contudo, as partículas de fronteira não se deslocam sobre a ação das forças das partículas do fluido, permanecendo fixas ou em movimento caso seja imposta alguma condição de movimento.

Para além da DBC apresentada, também ocorre a repulsão das partículas nas proximidades da fronteira. Este fenómeno ocorre quando uma partícula de fluido se aproxima da fronteira e o

espaçamento entre as mesmas torna-se inferior a h , a densidade da partícula de fronteira aumenta originando um aumento de pressão.

A força repulsiva é dependente do intervalo de tempo definido, sendo que, para um passo de tempo menor permite maiores velocidades das partículas do fluido ao interagirem com as partículas da fronteira sólida.

3.2.1 Interação fluido - corpo flutuante

No código DualSPHysics, todos os corpos flutuantes são tratados como corpos rígidos, pelo que, a força resultante pode ser obtida a partir da soma das contribuições de todas as partículas [22].

Cada partícula de fronteira k experimenta uma força por unidade de massa dada por:

$$\mathbf{f}_k = \sum_{a \in FP} \mathbf{f}_{ka} \quad (3.10)$$

onde FP representa as partículas de fluido e \mathbf{f}_{ka} é o vetor força por unidade de massa exercida pela partícula de fluido a ao interagir com a partícula da fronteira k . Portanto, o vetor força pode ser obtido da seguinte forma:

$$m_k \mathbf{f}_{ka} = -m_a \mathbf{f}_{ak} \quad (3.11)$$

Pela aplicação da segunda lei de Newton, o movimento do corpo flutuante é descrito da seguinte forma:

$$M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \sum_{k \in BP} m_k \mathbf{f}_k \quad (3.12)$$

$$I \frac{d\mathbf{\Omega}}{dt} = \sum_{k \in BP} m_k (\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_0) \cdot \mathbf{f}_k \quad (3.13)$$

onde BP representa as partículas de fronteira do corpo flutuante, $\mathbf{\Omega}$ é o vetor da velocidade angular, \mathbf{R}_0 é o vetor do centro de massa e \mathbf{V} é o vetor velocidade do corpo flutuante. Os parâmetros M e I representam a massa e o momento de inércia do corpo flutuante.

A velocidade de cada partícula de fronteira k do corpo flutuante é dado por:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{V} + \mathbf{\Omega} * (\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_0) \quad (3.14)$$

A integração em cada passo de tempo da Equação (3.14) permite obter o movimento do corpo flutuante [23].

3.2.2 Esquemas de integração numérica

No DualSPHysics a integração numérica dependente da condição de CFL (*Courant Friedrich Levy*), sendo que, de forma a garantir esta condição, o intervalo de tempo variável é calculado da seguinte forma [21]:

$$\Delta t = 0.3 \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (3.15)$$

onde Δt_f e Δt_{cv} representam o intervalo de tempo do vetor da força por unidade de massa $|f_a|$ e o intervalo de tempo que controla a condição de CFL, respetivamente. Estes intervalos de tempo são definidos da seguinte forma:

$$\Delta t_f = \min \left(\sqrt{\frac{h}{|f_a|}} \right) \quad (3.16)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \left(\frac{\sqrt{h/|f_a|}}{c_s + \max_b \left| \frac{h(v_a - v_b)(r_a - r_b)}{(r_a - r_b)^2 + \eta^2} \right|} \right) \quad (3.17)$$

onde c_s representa uma constante cujo seu intervalo de valores varia entre 0.1 e 0.3, [15] e [24].

3.2.2.1 Esquema de Symplectic

Nesta dissertação, a integração numérica é feita usando o esquema Symplectic [25]. Este esquema consiste num conjunto de algoritmos de integração de segunda ordem reversíveis no tempo, onde as equações da conservação da massa (3.4) e do balanço da quantidade de movimento (3.7) e a variação da posição das partículas, são simplificadas da seguinte forma, respetivamente:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = D_a \quad (3.18)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = F_a \quad (3.19)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \mathbf{v}_a \quad (3.20)$$

Este esquema apresenta algumas vantagens em comparação com outros, como por exemplo, a sobrecarga computacional não ser tão extensa e pesada, isto é, não requer múltiplos cálculos para cada etapa. As Equações (3.21) e (3.22) são definidas para uma fase de previsão de modo a obter valores referentes à densidade e à posição das partículas num passo intermédio de tempo da seguinte forma:

$$\rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \quad (3.21)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{r}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_a^n \quad (3.22)$$

Para além da fase de previsão anteriormente referida, o esquema Symplectic também apresenta uma fase de correção onde $(d\mathbf{v}_a^{n+\frac{1}{2}})$ corresponde à aceleração e é utilizado para calcular a velocidade corrigida. Assim, obtém-se a posição e a velocidade das partículas no final do passo de tempo da seguinte forma:

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_a^{n+1} \quad (3.24)$$

Por fim, a partir das Equações (3.23) e (3.24) procede-se à correção do valor da densidade definida da seguinte forma:

$$\frac{d\rho_a^{n+1}}{dt} = D_a^{n+1} \quad (3.25)$$

3.3. Parâmetros numéricos utilizados

A Figura (3.2) descreve o procedimento numérico adaptado para a análise dos casos de estudo nos Capítulos 4 e 5, nomeadamente o estudo da interação onda-corpo flutuante. Numa primeira parte, pré-processamento, são definidos os parâmetros necessários para correr o DualSPHysics em conformidade com as características do escoamento e com o dispositivo em estudo.

Para além dos parâmetros definidos, recorre-se ao programa *SolidWorks®* para criar a geometria num formato *.stl* de modo a que seja possível importar para um ficheiro em formato *.xml*.

Ao serem introduzidos os parâmetros numéricos referidos, assim como as características de ondas geradas por um batedor para um ficheiro em formato *.xml*, este está pronto para ser lido pelo executável, *GenCase.exe*. Este executável gera um ficheiro que contém os parâmetros de execução do programa num ficheiro formato *.bi4*.

Numa fase posterior à simulação são gerados ficheiros de saída com os resultados da simulação. De forma idêntica ao ficheiro gerado pelo executável *GenCase.exe*, o código DualSPHysics gera também ficheiros *.bi4* contendo dados das partículas envolvidas em cada instante da simulação, assim como outros parâmetros como a velocidade, a aceleração e a pressão das partículas que constituem o fluido presente no canal.

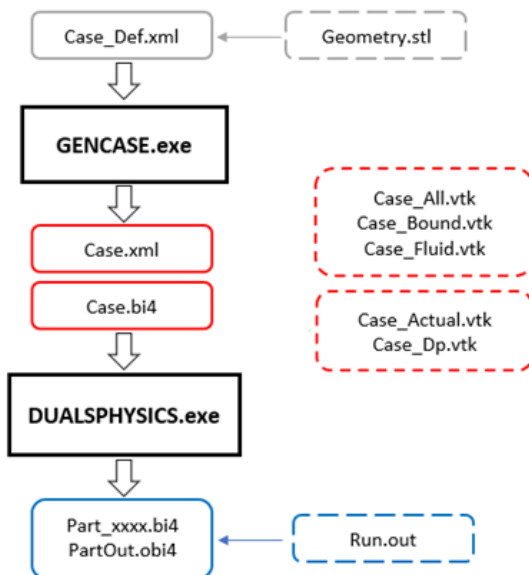


Figura 3.2 - Esquema numérico do DualSPHysics com ficheiros de entrada (vermelho) e ficheiros de saída (azul)
(Adaptado: [19])

No pós-processamento, o ficheiro de saída gerado pelo DualSPHysics.exe, *part_XXX.bi4*, possibilita a exportação dos ficheiros em formato *.vtk* obtidos para o programa *Paraview v5.6.0*. Esta plataforma permite visualizar os resultados pretendidos em 2D e 3D, do movimento de ondas geradas pelo batedor ao longo de um tempo definido no código e os respetivos intervalos de velocidade, aceleração e pressão das partículas do fluido existentes no canal.

A Tabela (3.1) descreve os principais parâmetros utilizados para as simulações no DualSPHysics definidos no pré-processamento a partir de um ficheiro *.xml*, [15].

Tabela 3.1 – Principais parâmetros utilizados no DualSPHysics

Parâmetros Numéricos	Valor/Método utilizado
StepAlgorithm	Symplectic
Interpolation Kernel	Wendland
ViscoTreatment	Artificial
Viscosity Value	0.01
CFL number	0.2
Polytropic constant	7
Maximum time step	0.0001 s
Minimum time step	0.00001 s
Time of simulation	30 s
Time out data	0.05 s
Smoothing length coefficient	1.2
DeltaSPH	0.1

Por fim, o código DualSPHysics gera também um ficheiro de saída que contém todos os dados referentes ao caso simulado, *Run.out*.

3.4. Geração de ondas com absorção ativa

A geração de ondas é feita utilizando um batedor do tipo *pistão* com absorção ativa.

Recorrendo às Equações (3.26) e (3.27) deduzidas a partir da teoria linear de ondas, obtém-se a posição das partículas sólidas que definem a posição do batedor e a sua respetiva velocidade.

$$X_b(t) = X_b(t_0) + A_b \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (3.26)$$

onde A_b corresponde à amplitude do movimento do batedor, $X_b(t_0)$ representa a posição inicial do batedor, T corresponde ao período da onda e t corresponde ao tempo do movimento do batedor definido nas simulações.

Ao derivar a Equação (3.26) obtém-se a velocidade das partículas que constituem o batedor:

$$U_b(t) = \left(\frac{2\pi A_b}{T}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (3.27)$$

Para suavizar a velocidade inicial do movimento recorre-se a uma rampa de velocidade, de modo a evitar instabilidades numéricas. A implementação da rampa de velocidade origina uma modificação da posição inicial das partículas do batedor. Portanto, é necessário recorrer a uma correção da posição inicial a fim de absorver as ondas refletidas e evitar a reflexão junto do batedor [12].

De modo a obter a correção da posição inicial, $X_b(t)$, estima-se a elevação da superfície livre da onda refletida, η_R , a ser absorvida:

$$\eta_R = \eta_T - \eta_{SPH} \quad (3.28)$$

onde η_T representa a elevação da superfície livre teórica e η_{SPH} a elevação da superfície livre diante do batedor.

Portanto, a Equação (3.29) descreve a correção da velocidade das partículas para a absorção das ondas refletidas no canal.

$$U_R = \eta_R \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (3.29)$$

onde d corresponde à profundidade.

Para a obtenção da nova posição inicial das partículas que constituem o batedor é necessário recorrer a uma integração da Equação (3.29). Deste modo, a posição $X_b(t)$ dada pela Equação (3.30), tem em consideração a correção da velocidade das partículas do batedor com absorção ativa representada pela Equação (3.31).

$$X_b(t) = X_b(t_0) + \int_0^t (U_T + U_R) dt \quad (3.30)$$

$$U_b(t) = U_T + U_R \quad (3.31)$$

3.5. Implementação do CPU e GPU no modelo SPH

O método SPH requer grandes esforços computacionais para resolver todas as interações entre partículas a cada passo-tempo, pelo que uma simples unidade central de processamento (CPU) pode não ser suficiente para o processamento do código. No período de processamento do código requer-se que as simulações decorram em curtos períodos de tempo e para uma simples unidade de processamento a analisar cada partícula dentro de um domínio é necessário recorrer a computadores mais sofisticados [21].

Ao recorrer a unidades gráficas de processamento (GPU), através da plataforma CUDA, e como a aplicação DualSPHysics é executável através da implementação do CPU ou do GPU, gera resultados que exibem pequenas diferenças entre si. Estas pequenas diferenças aparecem porque o GPU consegue executar operações com uma melhor performance para um curto período de tempo de simulação de uma superfície livre, permitindo analisar grandes quantidades de dados por segundo. Deste modo, a implementação do GPU aparenta ser uma alternativa mais económica e eficiente em comparação com o CPU [19].

A técnica mais eficiente encontrada para minimizar a comunicação entre o CPU e o GPU é representada pela Figura (3.3). Deste modo, é possível reduzir o tempo de processamento obtendo resultados precisos, eficientes e fiáveis.

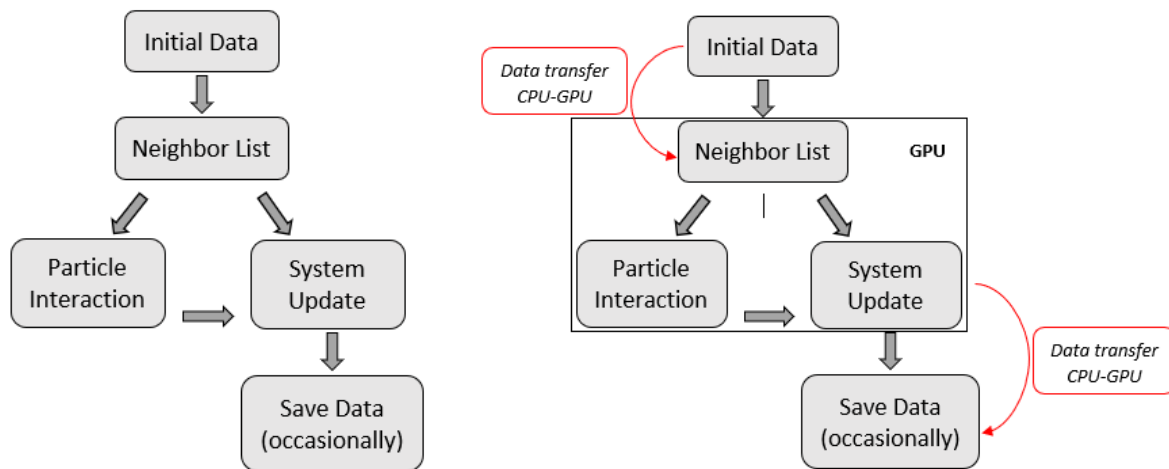


Figura 3.3 - Fluxograma da implementação CPU (esquerda) e GPU (direita) no método SPH (Adaptado: [19])

4. Testes e verificação do código DualSPHysics na cinemática e dinâmica de corpos flutuantes

Neste capítulo comparam-se e testam-se simulações numéricas bidimensionais e tridimensionais de um corpo flutuante paralelepipedico sujeito a agitação regular e irregular, recorrendo ao modelo numérico DualSPHysics.

A verificação do modelo numérico utilizado é efetuada recorrendo a resultados bibliográficos [2] obtidos para escoamentos 2D e onda regular.

Seguidamente, analisam-se as solicitações a que o corpo flutuante fica sujeito utilizando diferentes distâncias iniciais entre partículas (d_p) e alturas de onda (H), por forma a identificar a dependência da precisão dos resultados com estes parâmetros.

Termina-se o estudo bidimensional comparando o movimento do corpo flutuante calculado com os resultados apresentados em [2].

No estudo tridimensional são realizados dois testes correspondentes a agitação regular e irregular. Apresentam-se os resultados referentes à cinemática e dinâmica do corpo paralelepipedico.

4.1. Interação onda regular-corpo flutuante 2D

Para proceder à verificação do modelo numérico DualSPHysics, comparam-se as simulações realizadas no âmbito deste trabalho com os resultados apresentados em [2]. Para tal, simula-se um canal e um corpo flutuante com as dimensões apresentadas na Figura (4.1).

Em [2] apresenta-se o estudo bidimensional de um corpo flutuante sujeito a agitação regular gerada por um batedor determinando-se a sua cinemática e dinâmica. Relativamente ao canal utilizado em [2], o gerador de ondas foi substituído por um batedor com absorção ativa, por forma

a reduzir os efeitos de reflexão da onda. A parede vertical dissipativa (Sponge Layer) existente em [2] foi substituída por uma praia inclinada com 22° .

O corpo flutuante paralelipédico 2D, com dimensões $0.8 \times 0.4 \text{ m}$, é colocado a 4.2 m do batedor (Fig. 4.1). O canal tem comprimento 7 m e uma altura máxima 2 m .

O corpo flutuante é considerado homogéneo com uma massa volúmica de 500 kg/m^3 . O batedor tem um curso horizontal de 0.30 m e a profundidade da água é de 1.2 m . (No que se segue apresentam-se também simulações para profundidades diferentes devidamente identificadas).

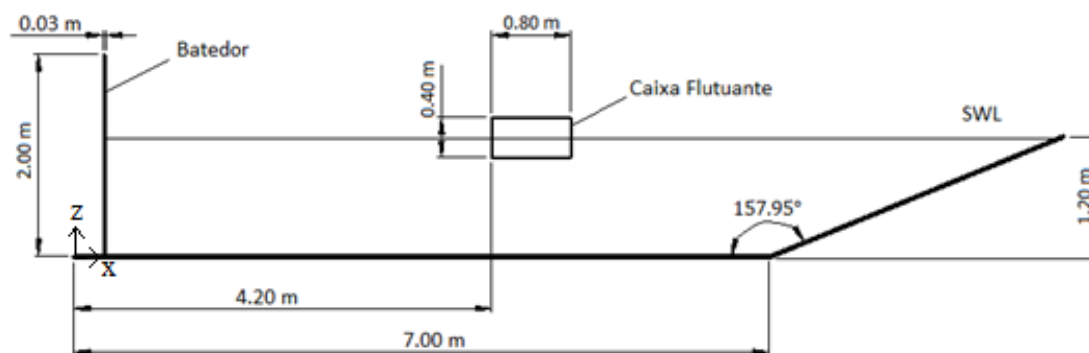


Figura 4.1 - Canal utilizado nas simulações numéricas

Nas simulações seguidamente apresentadas são utilizados parâmetros idênticos aos considerados em [2] variando-se apenas a distância inicial entre partículas, d_p . As condições de agitação, altura H , o período T e a profundidade do canal d , são também idênticas às de [2].

Em [2] são apresentados resultados para 4 casos distintos. No entanto, neste trabalho também fez-se variar o valor da distância inicial entre partículas d_p e consequentemente, o número de partículas simuladas. Optou-se assim por utilizar dois valores de d_p e por comparação com os resultados publicados, concluir sobre a precisão da discretização utilizada, nomeadamente se os resultados publicados são independentes da discretização.

A Tabela (4.1) resume os parâmetros utilizados nas oito simulações efetuadas.

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados nas simulações bidimensionais

Período de onda	Profundidade	Altura de onda	Distância inicial entre partículas	Nº de Partículas
$T = 1.2 \text{ s}$	$d = 1.2 \text{ m}$	$H = 0.06 \text{ m}$	$d_p = 0.006 \text{ m}$	272380
			$d_p = 0.003 \text{ m}$	1081022
		$H = 0.20 \text{ m}$	$d_p = 0.020 \text{ m}$	25162
			$d_p = 0.005 \text{ m}$	391213
$T = 1.2 \text{ s}$	$d = 0.4 \text{ m}$	$H = 0.10 \text{ m}$	$d_p = 0.010 \text{ m}$	28516
			$d_p = 0.005 \text{ m}$	111808
		$H = 0.04 \text{ m}$	$d_p = 0.004 \text{ m}$	174086
			$d_p = 0.002 \text{ m}$	683605

Note-se que em [2] todas as simulações numéricas foram efetuadas com uma distância inicial entre partículas fixa igual a 0.010 m .

As características do meio informático utilizado nas simulações numéricas são: Nvidia GeForce RTX 2060, VRAM de 6 GB.

4.1.1 Verificação da cinemática e dinâmica (estudo bidimensional)

O código DualSPHysics tem como saída as coordenadas instantâneas da posição do centro de massa do flutuador (x , z), bem como o seu momento de inércia. Para obtenção das solicitações procedeu-se à dupla diferenciação numérica e à aplicação de $F_x = m \ddot{x}$, $F_z = m \ddot{z}$ e $M = I \ddot{\theta}$.

Em cada caso, a primeira simulação corresponde à utilização do $d_p = \frac{H}{10}$. Na segunda simulação refina-se o anterior critério de discretização para aproximadamente metade, $d_p \cong \frac{H}{20}$.

Este procedimento permitiu detetar:

- Os resultados melhoram com a redução de d_p (aumento do número de partículas).
Se existia independência da discretização nos resultados obtidos;

- Se os resultados da segunda simulação foram muito semelhantes aos da primeira. A primeira discretização assegura a necessária independência.

De forma a comparar com os resultados publicados em [2], para a profundidade de 1.2 m comparam-se apenas os esforços (força horizontal, vertical e momento). Para a profundidade de 0.4 m comparam-se apenas os movimentos (deriva, arfagem e balanço).

Nas Figuras (4.2) e (4.3) apresentam-se os resultados obtidos da força horizontal (F_x), vertical (F_z) e do momento (M) para o caso de estudo $H = 0.06\text{ m}$ utilizando valores de $d_p = 0.006\text{ m}$ e $d_p = 0.003\text{ m}$ respetivamente, com os resultados analíticos (Mei and Black, 1969) e numéricos citados em [2]. Os resultados foram adimensionalizados utilizando o período T , o comprimento da caixa paralelepédica $B_f = 0.8\text{ m}$, a profundidade d e a altura de onda H .

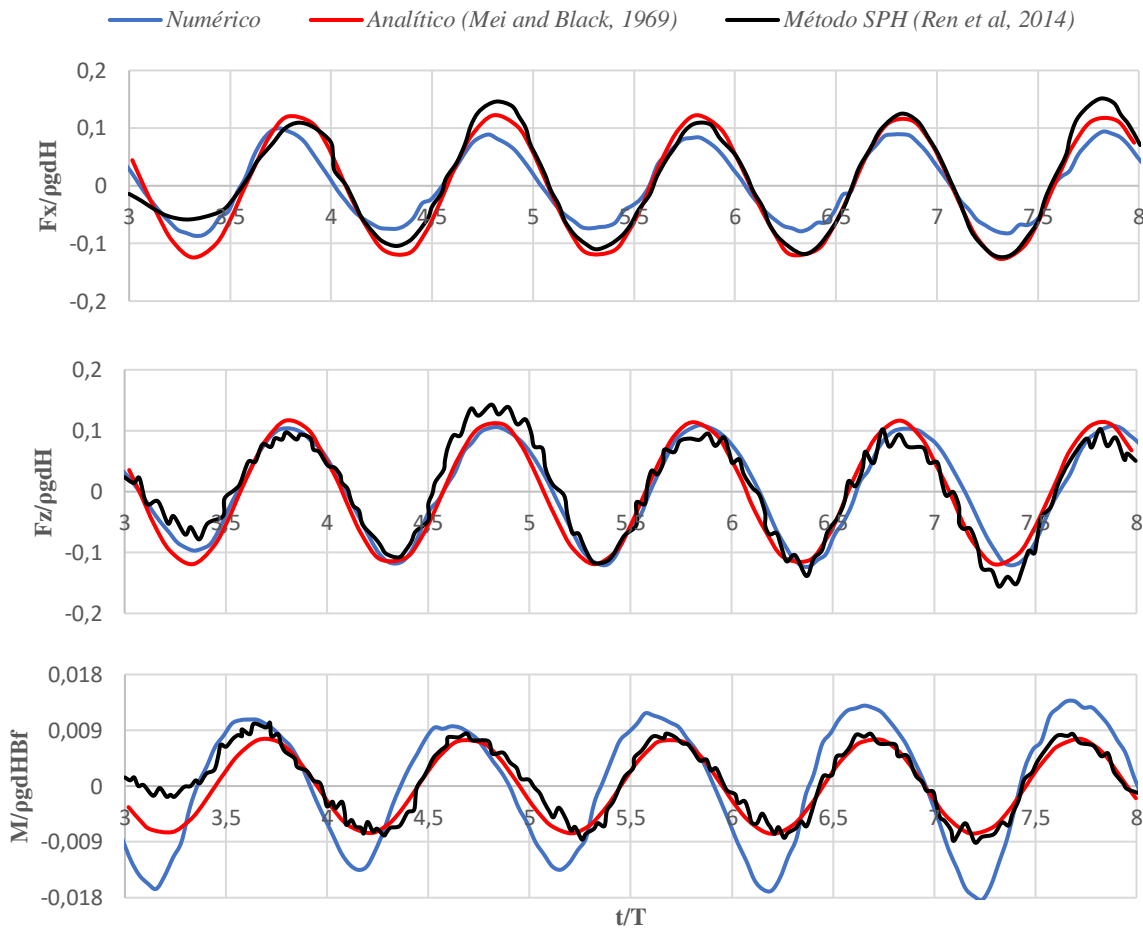


Figura 4.2 - Força horizontal, vertical e momento ($d_p = 0.006\text{ m}$ e $H = 0.06\text{ m}$)

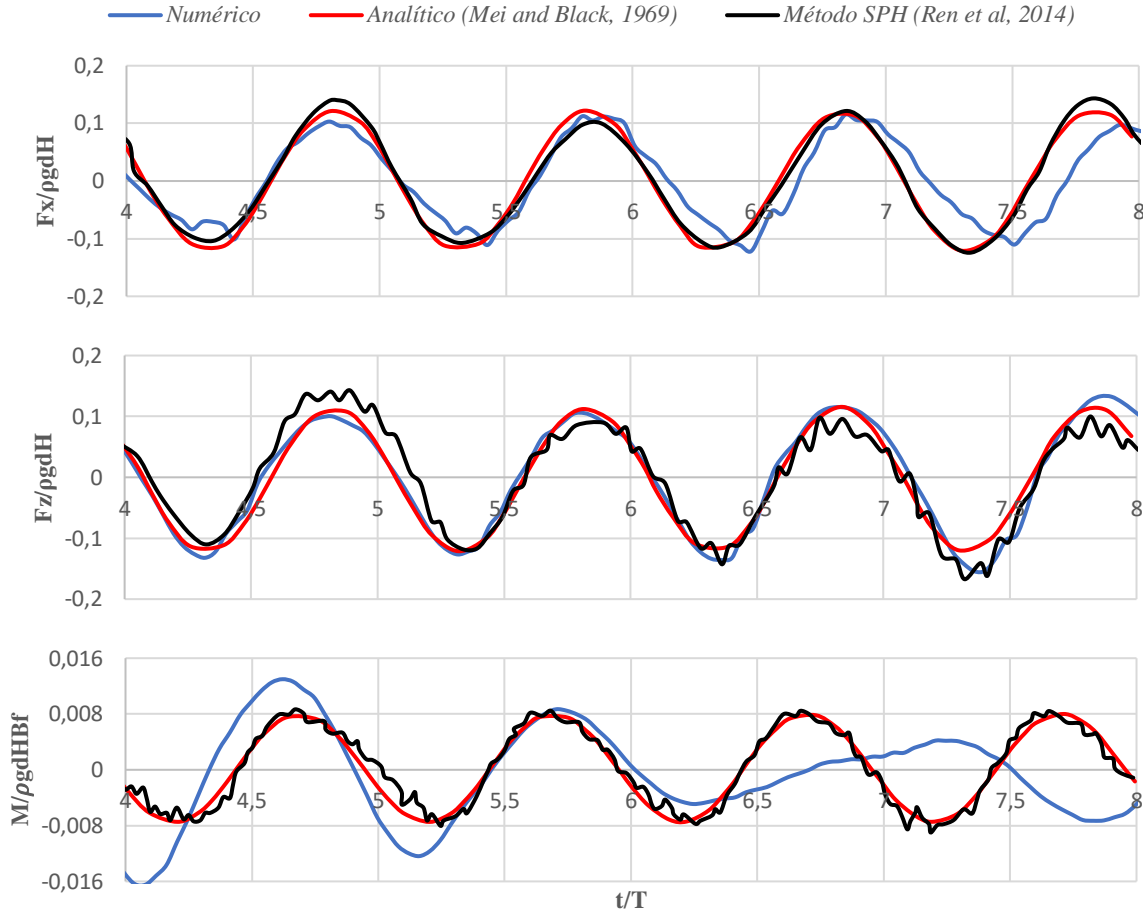


Figura 4.3 - Força horizontal, vertical e momento ($d_p = 0.003 \text{ m}$ e $H = 0.06 \text{ m}$)

Observando a Figura (4.2) verifica-se uma ligeira discrepância na amplitude nos gráficos da força horizontal e do momento. Verifica-se ainda que os resultados obtidos no âmbito deste trabalho apresentam uma oscilação de período mais baixo que o da onda (ruído), pelo que os resultados obtidos não necessitam de ser exatamente iguais aos resultados citados em [2].

De forma a testar a independência da densidade do número de partículas, utiliza-se um valor de d_p menor nas simulações para $H = 0.06 \text{ m}$, Fig. (4.3). Deste modo, obtém-se valores da amplitude de onda mais coerentes e satisfatórios.

Portanto, como os resultados numéricos melhoram com a redução do valor de d_p significa que os resultados publicados em [2] e os resultados obtidos para o valor de $d_p = 0.006 \text{ m}$ não são ainda independentes da discretização.

Nas Figuras (4.4) e (4.5) comparam-se os resultados obtidos da força horizontal (F_x), vertical (F_z) e do momento (M) para o caso de estudo $H = 0.20 \text{ m}$ utilizando valores de $d_p = 0.02 \text{ m}$ e $d_p = 0.005 \text{ m}$ respectivamente, com os resultados analíticos (Mei and Black, 1969) e numéricos [2].

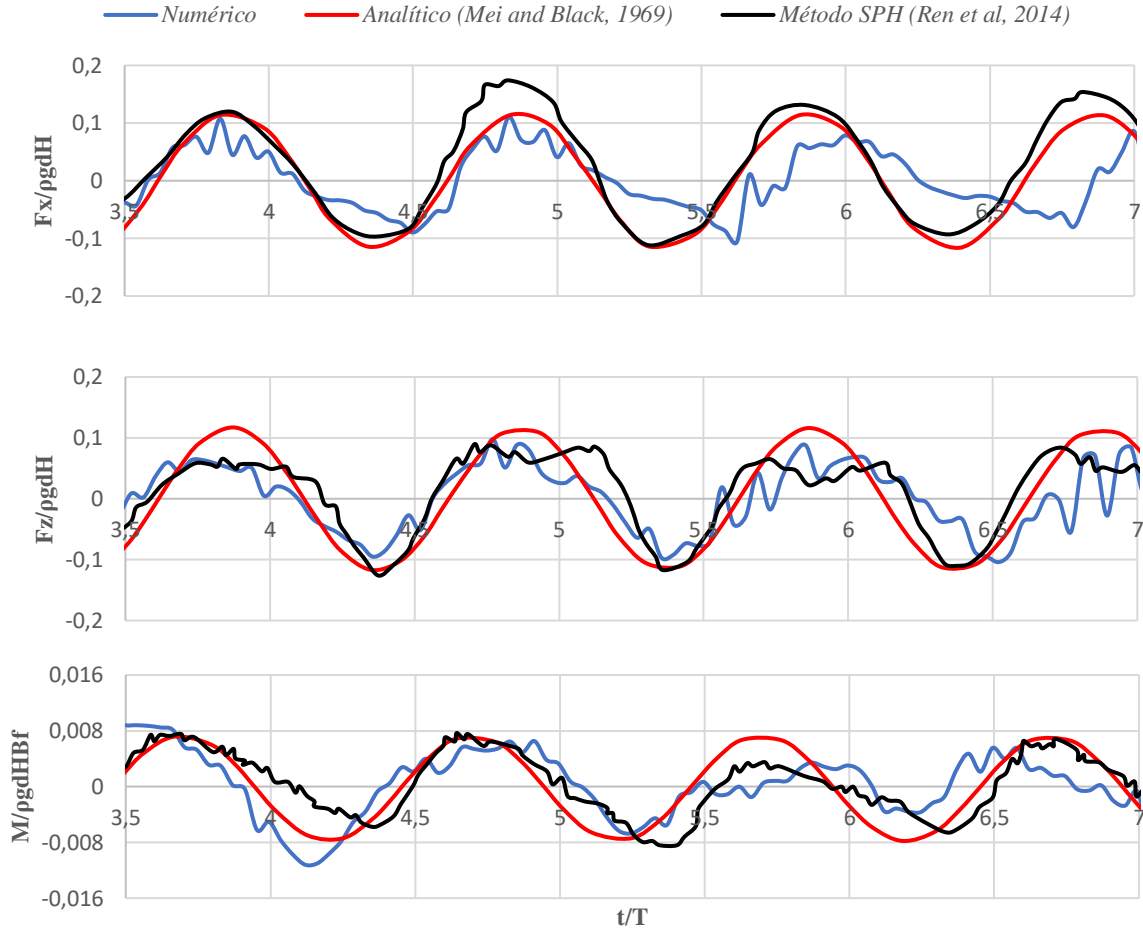


Figura 4.4 - Força horizontal, vertical e momento ($d_p = 0.02 \text{ m}$ e $H = 0.2 \text{ m}$)

Pode-se constatar na Figura (4.4) que os resultados obtidos apresentam verifica-se boa coerência global. Ao utilizar um valor de d_p menor nas simulações para $H = 0.2 \text{ m}$, Fig. (4.5), deteta-se uma redução da perturbação (ruído) e uma melhor dos resultados obtidos.

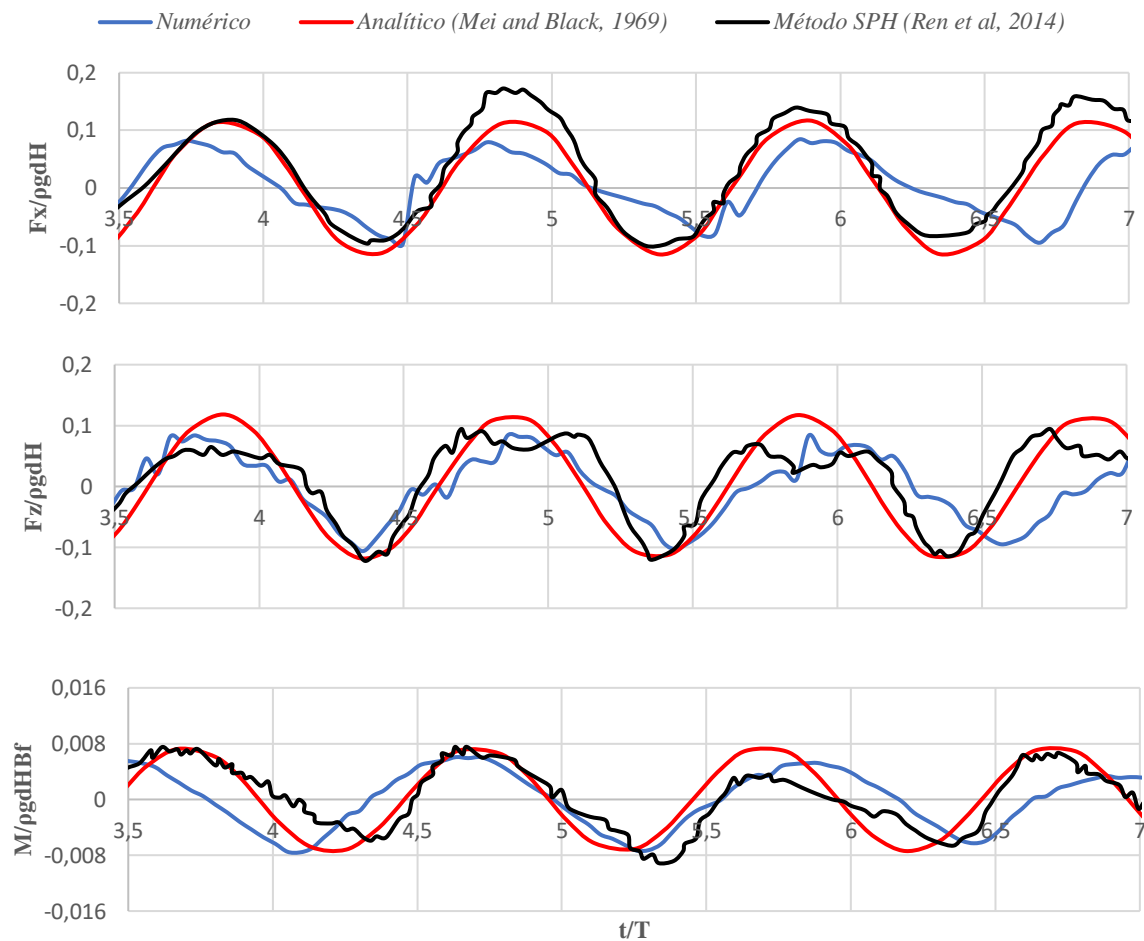


Figura 4.5 - Força horizontal, vertical e momento ($d_p = 0.005 \text{ m}$ e $H = 0.2 \text{ m}$)

Os resultados da segunda simulação, Fig.(4.5), foram bastante semelhantes aos da primeira, Fig.(4.4), pelo que o resultado obtido para o valor de $d_p = 0.02 \text{ m}$ no âmbito deste trabalho e o publicado em [2] são já independentes da discretização.

De forma a complementar o estudo realizado, recorreu-se ao programa *Paraview* para o pós-processamento. Desta forma é possível visualizar o campo de velocidade horizontal e a posição do flutuador na Figura (4.6).

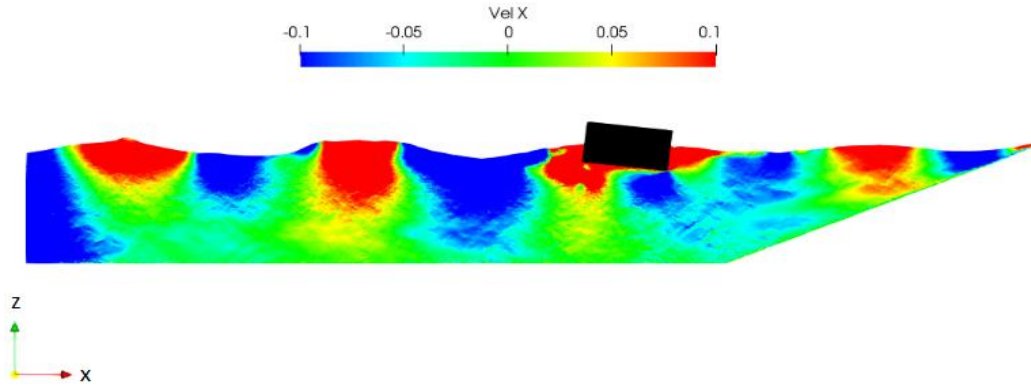


Figura 4.6 - Campo de velocidade horizontal e posição do flutuador ($d_p=0.006m$ e $H = 0.06m$)

O recurso às capacidades gráficas do *Paraview* permite uma interpretação qualitativa da dinâmica e cinemática do escoamento e do corpo flutuante, o que tem grande utilidade numa fase de projecto. Deste modo, são visíveis os picos de velocidade (vermelho) presentes na crista das ondas e, inversamente, uma diminuição da velocidade (azul) presente na cava das ondas ao longo do canal.

Concluída a análise das solicitações a que o corpo flutuante fica submetido para diferentes distâncias iniciais entre partículas (d_p) e alturas de onda (H), procede-se seguidamente à comparação da cinemática do flutuador com a obtida em [2]. Nomeadamente, os movimentos de deriva, arfagem e balanço.

Para efetuar esta comparação foi necessário proceder a simulações em que a profundidade do canal, as dimensões da caixa flutuante e o seu centroide foram alterados respetivamente para $d = 0.4 m$, $0.30 \times 0.2 (m)$ e $x_{centroide} = 2.0 m$; $z_{centroide} = 0.4 m$. Os parâmetros descritos na Tabela (4.1) são utilizados nas simulações dos movimentos do corpo flutuante 2D.

Utiliza-se inicialmente $d_p = \frac{H}{10}$ e posteriormente, efetua-se uma segunda simulação com um menor valor analisando-se a independência da discretização por comparação dos resultados obtidos com os resultados apresentados em [2].

Nas Figuras (4.7) e (4.8) comparam-se os resultados obtidos no âmbito deste trabalho (deriva- x , arfagem- z e balanço- θ_1 , respetivamente) para o caso de estudo $H = 0.10 m$ utilizando valores de $d_p = 0.01 m$ (idêntico ao utilizado em [2]) e $d_p = 0.005 m$ com os publicados em [2].

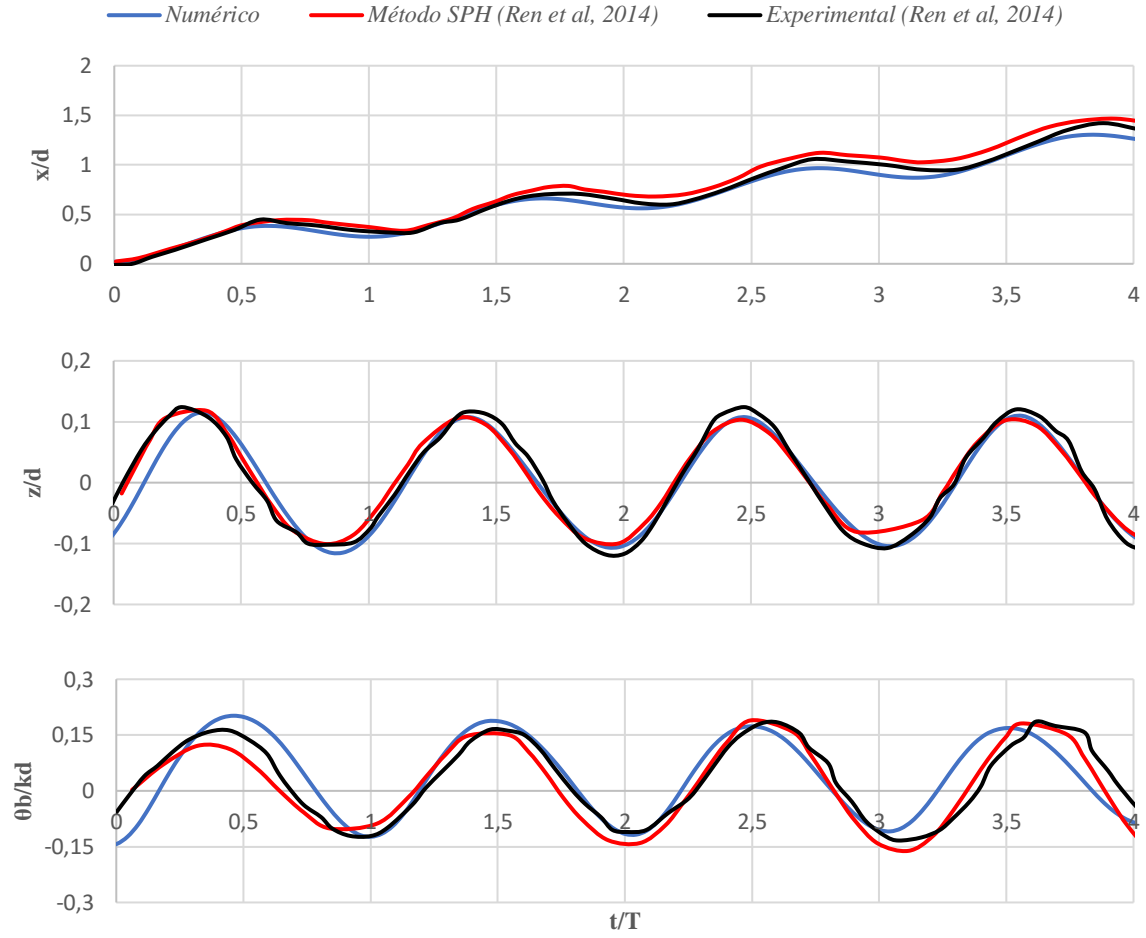


Figura 4.7 - Deriva, arfagem e balanço ($d_p = 0.01 \text{ m}$ e $H = 0.1 \text{ m}$)

Para a simulação representada na Figura (4.7) utilizando $d_p = 0.01 \text{ m}$, verifica-se uma boa concordância global dos resultados obtidos com os publicados em [2]. Reduzindo o valor de d_p para metade ($d_p = 0.005 \text{ m}$), Fig. (4.8), obtém-se resultados numéricos mais precisos em comparação com os resultados descritos na Figura (4.7).

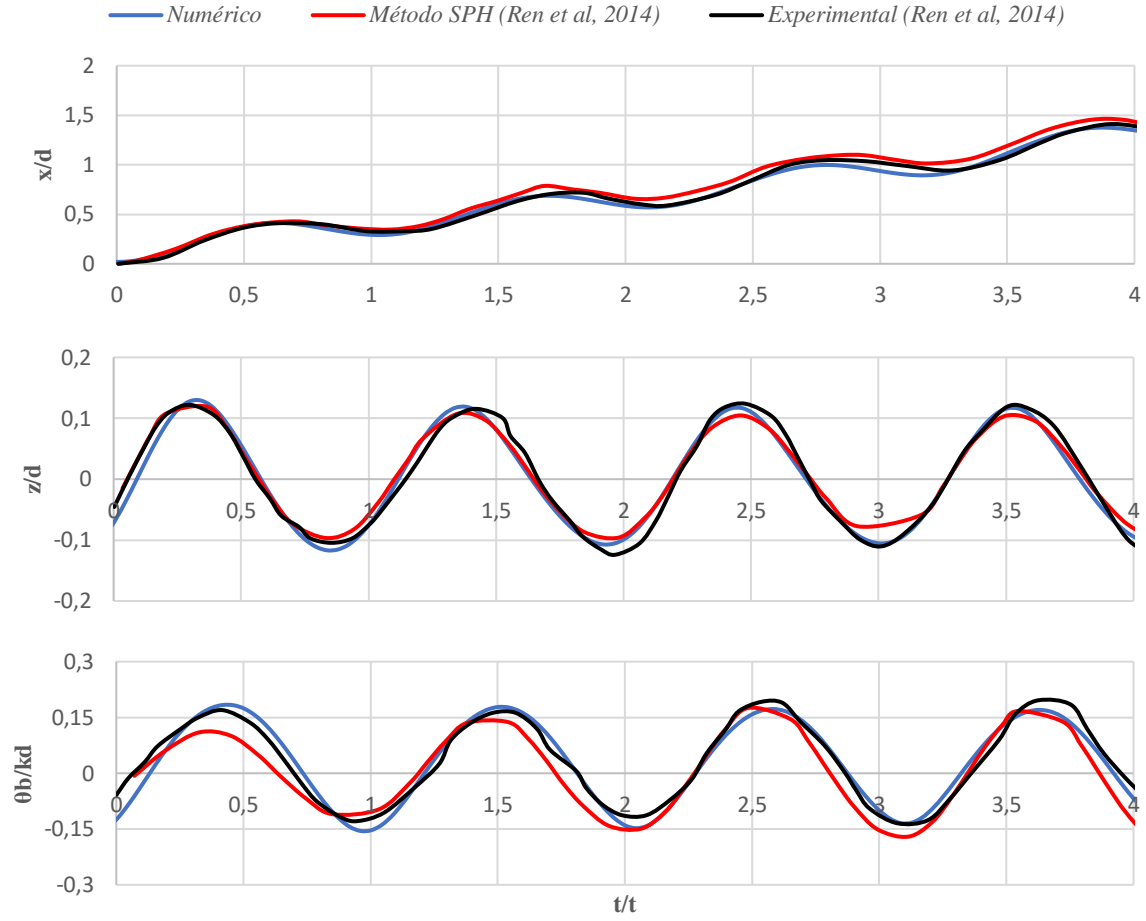


Figura 4.8 - Deriva, arfagem e balanço ($d_p = 0.005 \text{ m}$ e $H = 0.1 \text{ m}$)

Apesar dos resultados representados na Figura (4.8) apresentarem uma melhor coerência relativamente aos apresentados em [2], a diferença é pequena, pelo que o $d_p = 0.01 \text{ m}$ garante a suficiente independência da discretização.

Nas Figuras (4.9) e (4.10) efectua-se uma análise análoga às anteriores para o caso de estudo $H = 0.04 \text{ m}$ utilizando para valores de $d_p = 0.004 \text{ m}$ e $d_p = 0.002 \text{ m}$.

Para este último caso de estudo da verificação do modelo numérico os resultados obtidos permitem reforçar as tendências anteriormente detetadas, sendo suficiente a discretização $d_p = 0.004 \text{ m}$.

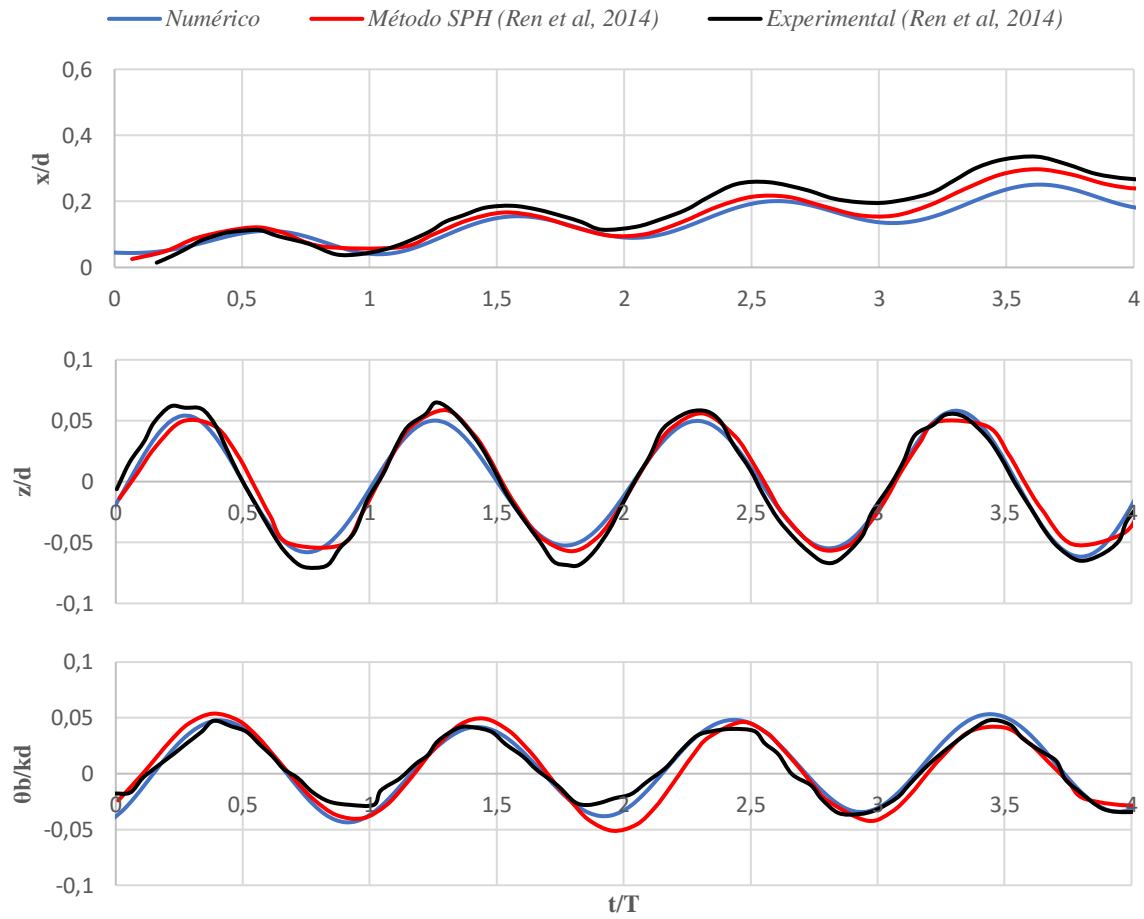


Figura 4.9 - Deriva, arfagem e balanço ($d_p = 0.004 \text{ m}$ e $H = 0.04 \text{ m}$)

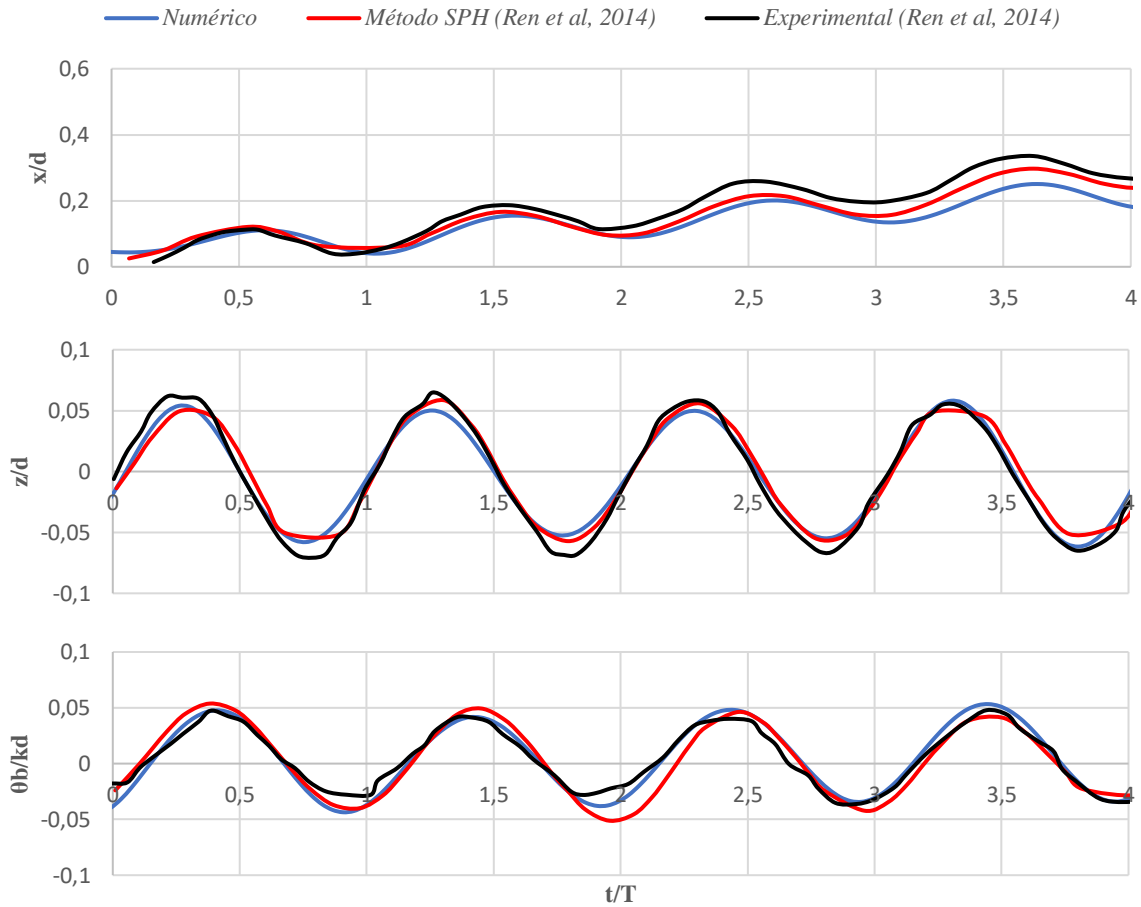


Figura 4.10 - Deriva, arfagem e balanço ($d_p = 0.002 \text{ m}$ e $H = 0.04 \text{ m}$)

Analogamente ao estudo realizado para a profundidade $d = 1.2 \text{ m}$, recorre-se novamente ao código *Paraview* para se obter o campo de velocidade horizontal e a posição do flutuador para $d = 0.4 \text{ m}$. Estes resultados podem ser consultados na Figura (4.11).

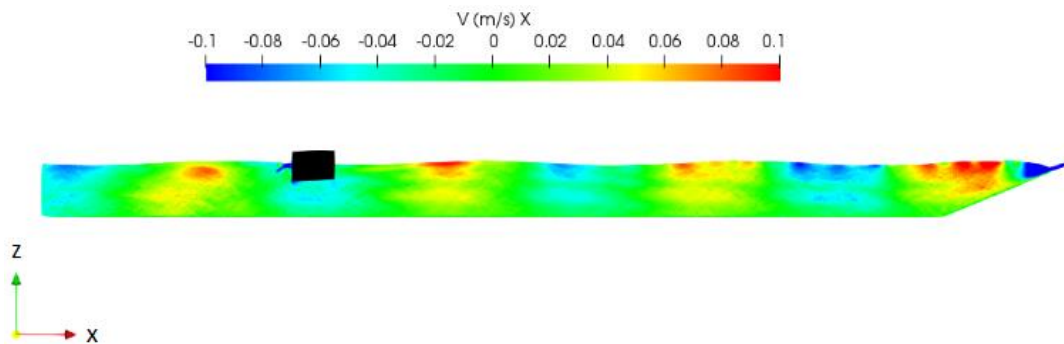


Figura 4.11 - Campo de velocidade horizontal e posição do flutuador ($d_p=0.004\text{m}$ e $H = 0.04\text{m}$)

As oito simulações efetuadas permitem verificar que os resultados relativos ao movimento do corpo flutuante (deriva, arfagem e balanço) apresentam uma maior coerência e precisão que os obtidos para a dinâmica do corpo flutuante (forças horizontal, vertical e momento). A utilização por (Ren et al, 2014) de $d_p = 0.01 \text{ m}$ revelou-se insuficiente, pois alguns dos seus resultados não parecem independentes da densidade de partículas utilizada.

As simulações realizadas neste trabalho permitem constatar que o critério $d_p \cong \frac{H}{20}$ garante uma precisão suficiente para o estudo proposto. Deste modo, conclui-se que o modelo DualSPHysics é adequado para o estudo bidimensional da interação regular com um corpo flutuante desde que seja garantida a necessária densidade de partículas.

4.2. Interação onda-corpo flutuante 3D

De forma a testar a capacidade do código DualSPHysics na simulação de plataformas offshore reais é necessário ensaiar a sua utilização com um objeto flutuante tridimensional, determinando o seu movimento nos seis graus de liberdade (avanço-recuo, deriva, arfagem, balanço, cabeceio, guinada).

Nesta seção, os resultados obtidos não são comparados com outros dados bibliográficos, pois pretendeu-se apenas testar o código para uma simulação tridimensional.

Com este objetivo efetuaram-se duas simulações de um corpo flutuante homogêneo com dimensões $0.8 \times 0.4 \times 0.6 \text{ m}$. Na primeira foi utilizada onda regular e na segunda agitação irregular, na Tabela (4.2) resumem-se os parâmetros relevantes. O domínio de cálculo corresponde ao tanque descrito na Figura (4.1) com $1,2 \text{ m}$ de largura.

O paralelepédico foi colocado no tanque por forma à sua maior dimensão (0.8 m) estar colinear com a direção de propagação da onda.

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados nas simulações tridimensionais

	Periodo	Profundidade	Altura de onda	Distância entre partículas	Nº de Partículas
Para ondas regulares	$T = 1.2 \text{ s}$	$d = 1.2 \text{ m}$	$H = 0.20 \text{ m}$	$d_p = 0.025 \text{ m}$	878481
Para ondas irregulares	$T_p = 1.9 \text{ s}$		$H_s = 0.20 \text{ m}$		

Após o estudo bidimensional realizado, verificou-se que para o valor de $d_p \cong \frac{H}{20}$ garante-se a independência da discretização. Contudo, os testes tridimensionais seguidamente apresentados são efetuados para o valor de $d_p \cong \frac{H}{10}$, uma vez que com os meios informáticos utilizados os tempos de simulação seriam demasiado elevados.

Analogamente ao efetuado no estudo bidimensional, para o pós-processamento de simulações tridimensionais, recorre-se ao programa *Paraview* de modo a obter o campo de velocidade horizontal e a posição do flutuador.

4.2.1 Teste tridimensional para ondas regulares

Na Figura (4.12) apresentam-se os esforços adimensionalizados e nas Figuras (4.13) e (4.14) representam-se os movimentos do corpo flutuante.

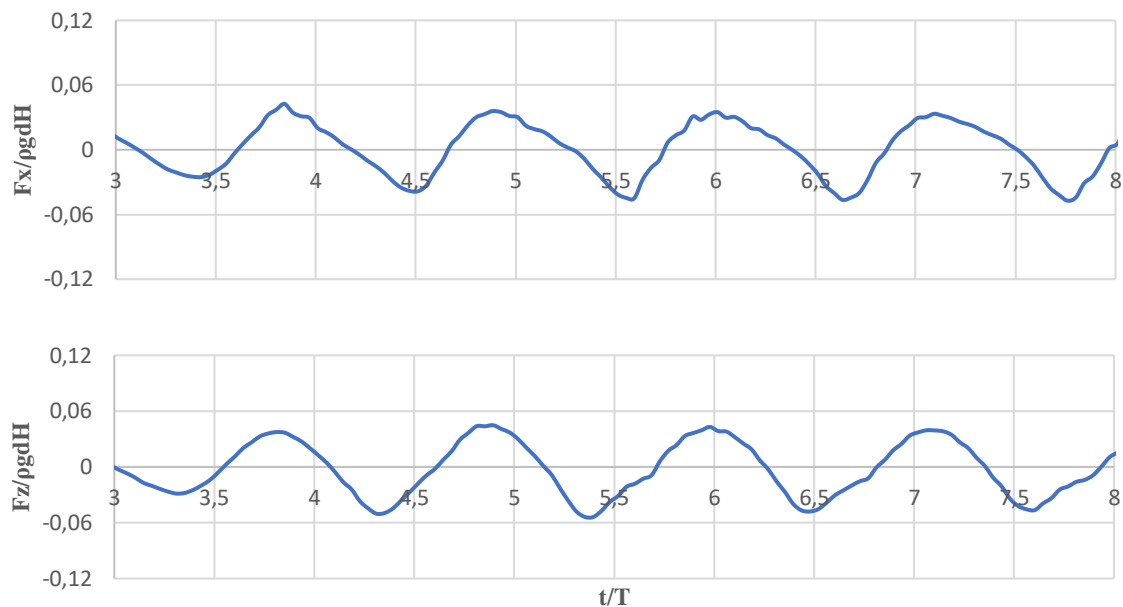


Figura 4.12 - Força horizontal e vertical ($H = 0.2 \text{ m}$ e $d_p = 0.025 \text{ m}$)

Optou-se por não apresentar a força da deriva uma vez que esta é perpendicular com a direção de propagação da onda e pouco significativa em relação às componentes horizontal e vertical da força.

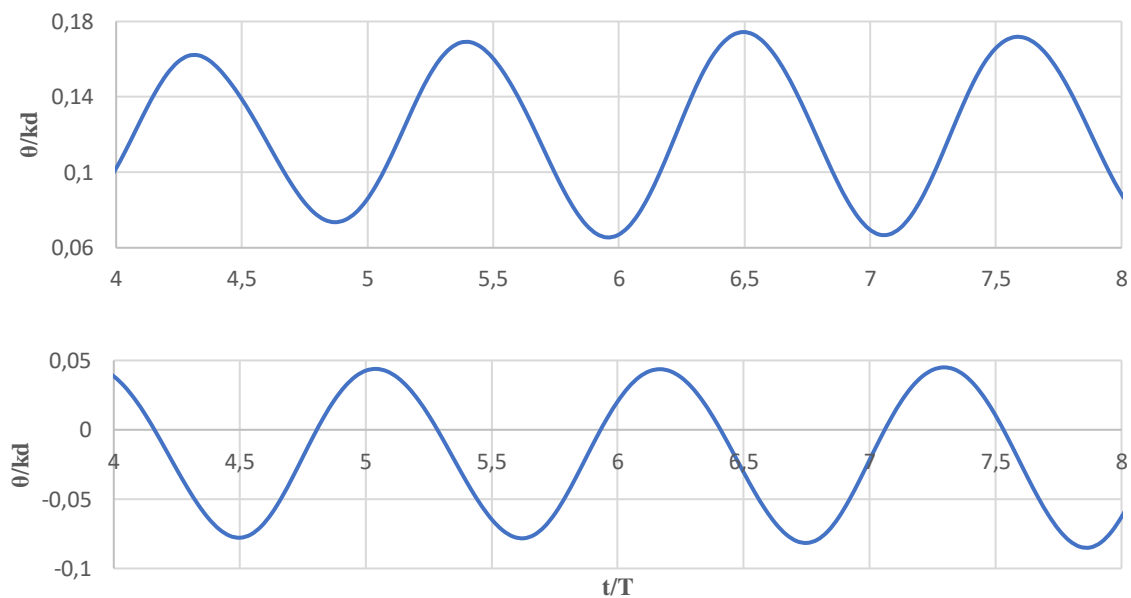


Figura 4.13 - Cabeceio e Balanço ($d_p = 0.025 \text{ m}$ e $H = 0.2 \text{ m}$)

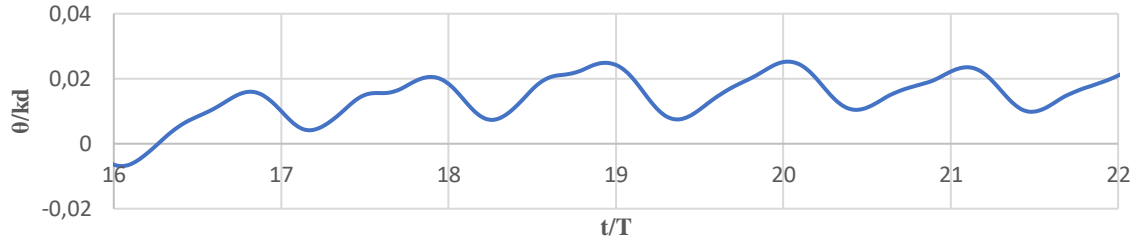


Figura 4.14 - Guinada ($d_p = 0.025 \text{ m}$ e $H = 0.2 \text{ m}$)

Observando os resultados dos esforços obtidos na Figura (4.12), verifica-se que a oscilação da curva numérica é pouco perturbada pelo ruído e com amplitude constante. Estes resultados são assim satisfatórios para ambas as componentes da força.

Na Figura (4.13) são representados os resultados obtidos do cabeceio e balanço do corpo flutuante para a onda regular. As curvas numéricas apresentam um perfil harmônico e constante ao longo da simulação. Verifica-se que o cabeceio é superior ao balanço, o que é coerente pois a propagação das ondas faz-se na direção da maior dimensão da caixa (eixo proa popa).

Os resultados obtidos referentes à guinada do flutuador, Fig. (4.14), apresentam uma oscilação menor em comparação com a oscilação obtida do cabeceio, Fig. (4.13), pois a caixa paralelepédica tem maior momento de inércia relativo ao eixo vertical do que relativamente ao eixo horizontal (amuras).

Para o caso de agitação com o período $T = 1.2 \text{ s}$, $H = 0.20 \text{ m}$ e profundidade 1.2 m , realizaram-se testes bi e tridimensionais. É assim legítimo comparar as forças horizontais e verticais.

Na Figura (4.15) comparam-se os resultados obtidos da força horizontal (F_x) e vertical (F_z). Os valores de d_p utilizados na simulação 3D e 2D são 0.025 m e 0.005 m , respetivamente.

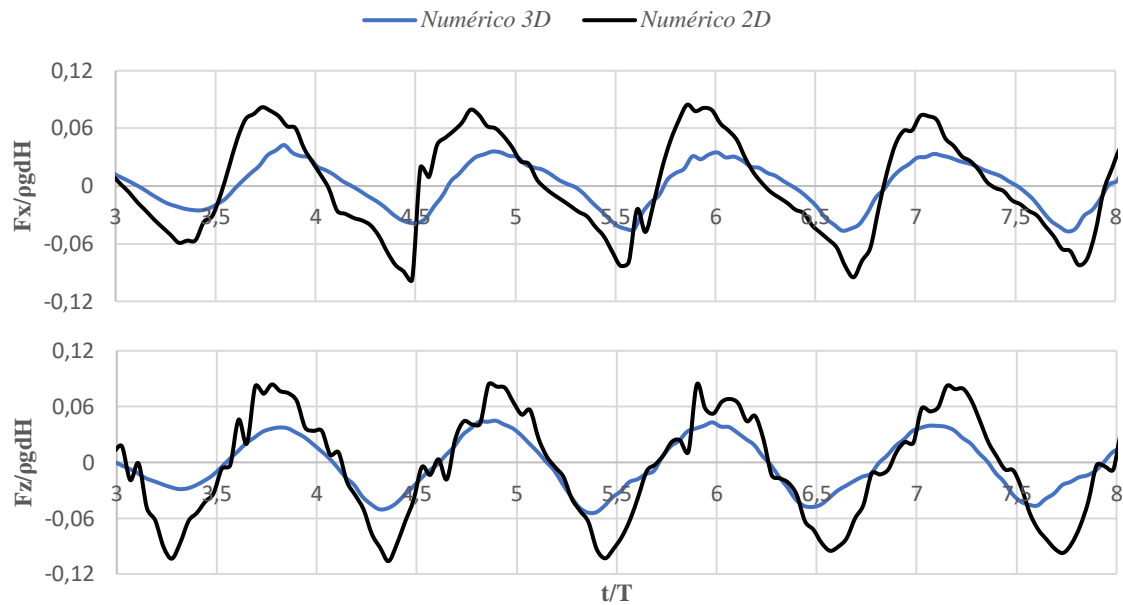


Figura 4.15 – Comparação dos esforços adimensionais 2D e 3D ($dp=0.005m$ e $dp=0.025m$)

Pode-se constatar na Figura (4.15) que os resultados 3D obtidos apresentam boa coerência global com os resultados numéricos 2D. Verifica-se que os níveis de ruído são semelhantes e que existe uma ligeira diferença de amplitudes das ondas.

De forma a complementar o estudo, o campo de velocidade horizontal e a posição do flutuador são obtidos com o código *Paraview*. O tratamento de imagem pode ser consultado na Figura (4.16).

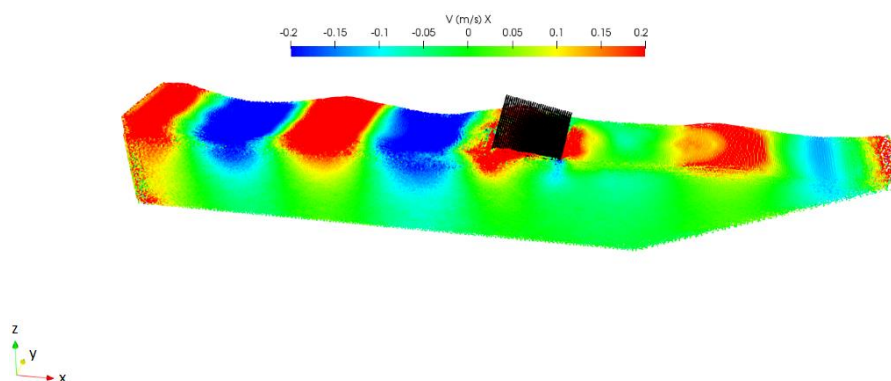


Figura 4.16 - Campo de velocidade horizontal, ondas regulares ($dp=0.025m$)

Analogamente ao estudo bidimensional efetuado, o código Paraview permite obter uma análise qualitativa dos movimentos da caixa paralelepédica e a visualização dos picos de velocidade (cristas) assim como das zonas onde a mesma é mais pequena (cavas).

Destes testes, concluí-se que o código numérico é capaz de calcular os esforços e respetivos movimentos nos seis graus de liberdade para uma agitação regular. O balanço e a guinada da caixa paralelepédica são praticamente irrelevantes em comparação com o cabeceio para o estudo tridimensional da cinemática do corpo flutuante.

4.2.2 Teste tridimensional para ondas irregulares

Para a profundidade $d = 1.2 \text{ m}$, período de pico $T_p = 1.9 \text{ s}$ e altura significativa $H_s = 0.2 \text{ m}$, testam-se os esforços horizontal (F_x) e vertical (F_z) adimensionais obtidos para a caixa paralelepédica, Fig. (4.17).

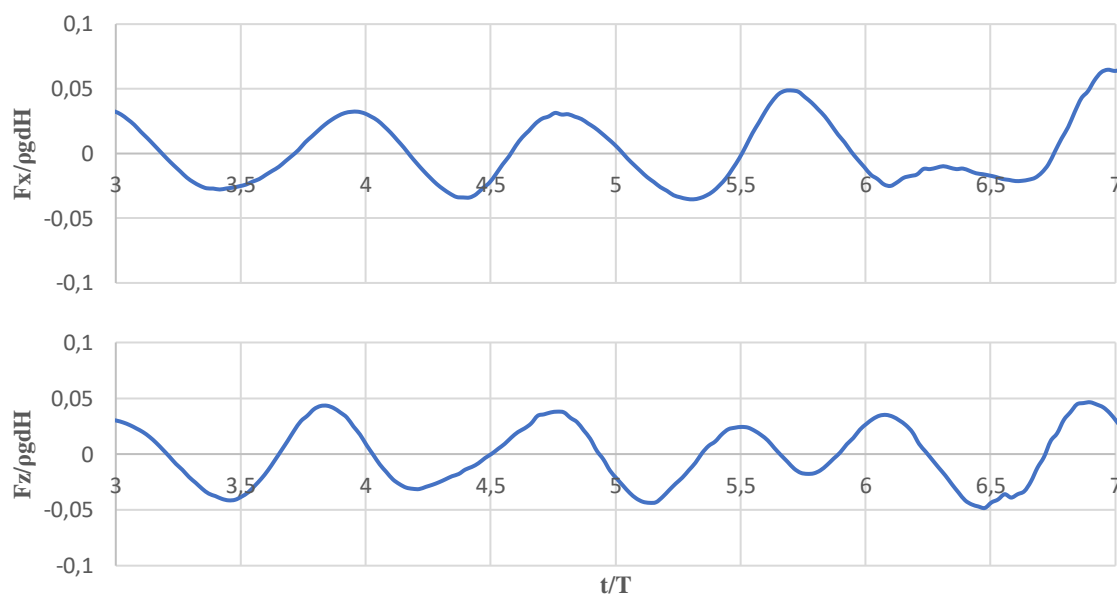


Figura 4.6 - Força horizontal e vertical ($H_s = 0.2 \text{ m}$ e $d_p = 0.025 \text{ m}$)

Nas Figuras (4.18) e (4.19) apresentam-se os movimentos do corpo (cabeceio, balanço e guinada), respetivamente.

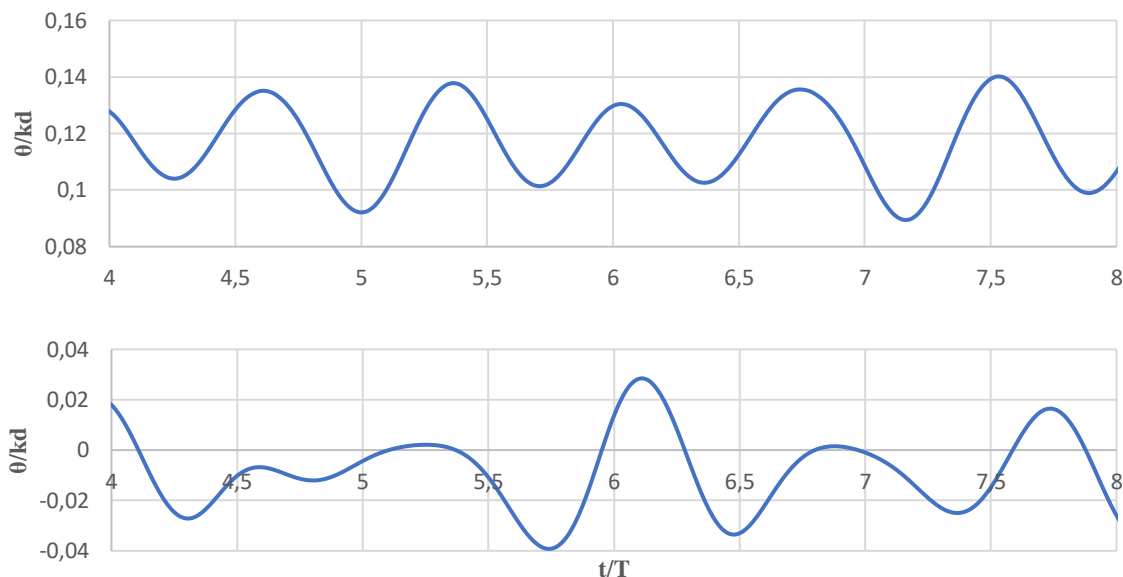


Figura 4.7 - Cabeceio e Balanço ($d_p = 0.025 \text{ m}$ e $H_s = 0.2 \text{ m}$)

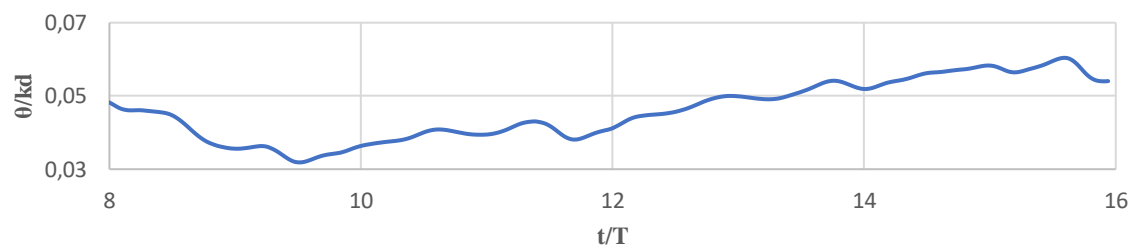


Figura 4.8 - Guinada ($d_p = 0.025 \text{ m}$ e $H_s = 0.2 \text{ m}$)

Nas Figuras (4.17) e (4.18) observa-se um comportamento predominantemente harmónico. Para a caso da guinada apresentado na Figura (4.19), o comportamento tem características não harmónicas devido a agitação não regular. Este comportamento está intimamente ligado ao facto do corpo ficar submetido sequencialmente a ondas de frequência e amplitude variável. Desta forma, inicia a sua rotação sobre a ação de uma onda não recuperando a sua posição inicial, pois fica simultaneamente sujeito a uma outra onda de características diferentes.

De forma idêntica, o campo de velocidade horizontal e a posição do flutuador são obtidos com o código *Paraview*. O tratamento de imagem pode ser consultado na Figura (4.20).

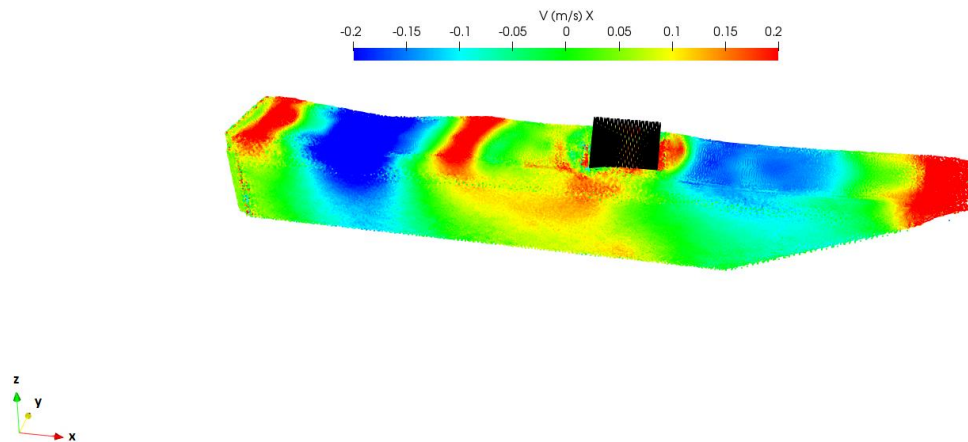


Figura 4.20 - Campo de velocidade horizontal, ondas irregulares ($dp=0.025m$)

Analogamente ao estudo com ondas regulares, o código numérico é capaz de calcular os esforços e respetivos movimentos nos seis graus de liberdade para uma agitação irregular.

5. Estudo do comportamento das plataformas

No capítulo 4 verificou-se a capacidade do código DualSPHysics na simulação da dinâmica e da cinemática de um corpo flutuante.

No estudo da cinemática e da operacionalidade das plataformas assumem especial relevância os movimentos de balanço e de arfagem. Os movimentos de avanço-recuo e deriva não são analisados neste trabalho uma vez que o necessário sistema de amarração restringe estes graus de liberdade.

Inicialmente, apresentam-se as geometrias das plataformas e dos tanques utilizados nas simulações, o sistema de coordenadas para cada plataforma e os parâmetros numéricos utilizados.

Seguidamente, determina-se os movimentos de arfagem e balanço das plataformas DeepCwind e TLP sujeitas a agitação regular e irregular.

Termina-se o estudo comparando os movimentos das plataformas de forma a verificar qual delas garante melhores condições de operacionalidade em condições de agitação regular e irregular.

5.1. Plataformas DeepCwind e TLP

A origem do sistema de coordenadas das plataformas DeepCwind e TLP está definida nas Figuras (5.1) e (5.2), respetivamente. O cabeceio e o balanço são movimentos análogos pois as plataformas são simétricas relativamente a três eixos. As plataformas são consideradas homogéneas com uma massa volúmica de 500 kg/m^3 .

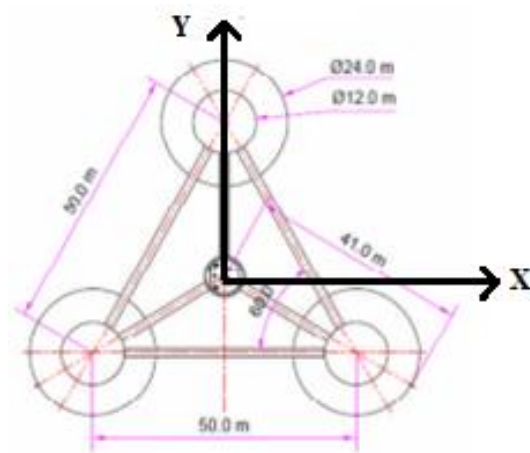
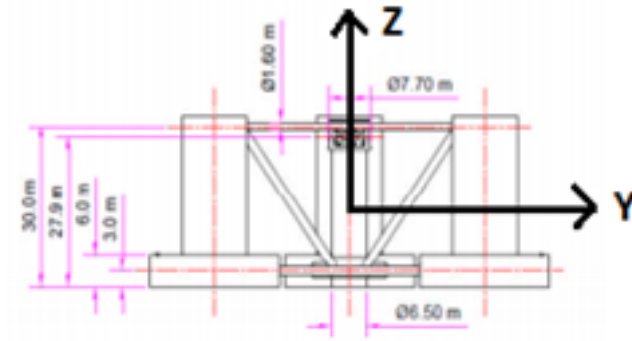


Figura 5.1 – Dimensões e sistema de coordenadas da plataforma DeepCwind

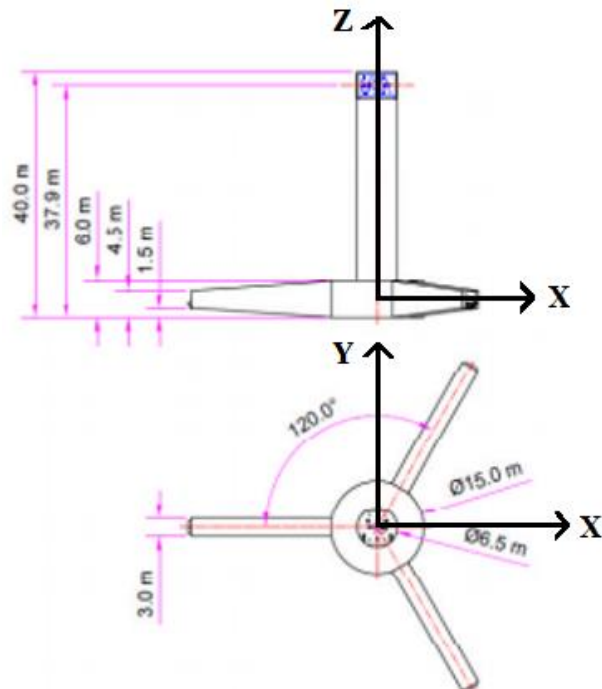


Figura 5.2 – Dimensões e sistema de coordenadas da plataforma TLP

Nas simulações a linha de água média situa-se a uma cota de 5.2 m relativamente à base das plataformas DeepCwind e TLP.

5.2. Domínio de cálculo e caracterização da agitação

As Figuras (5.3) e (5.4) apresentam as dimensões do tanque e a posição das plataformas DeepCwind e TLP utilizadas nas simulações.

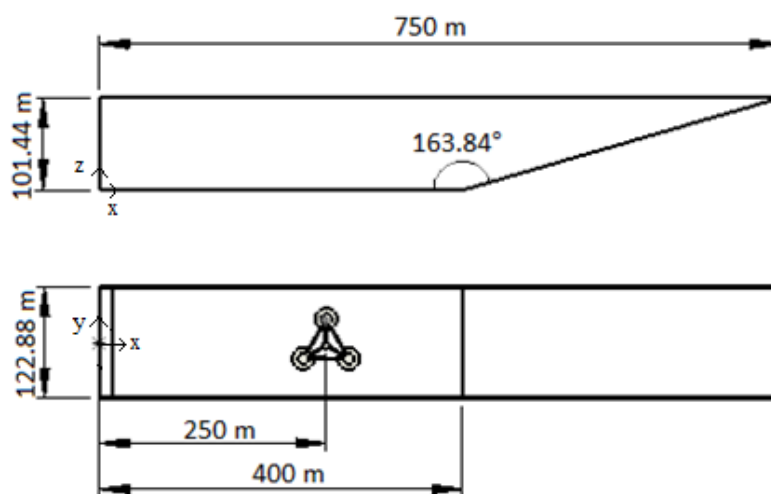


Figura 5.3 – Tanque utilizado nas simulações com a plataforma DeepCwind

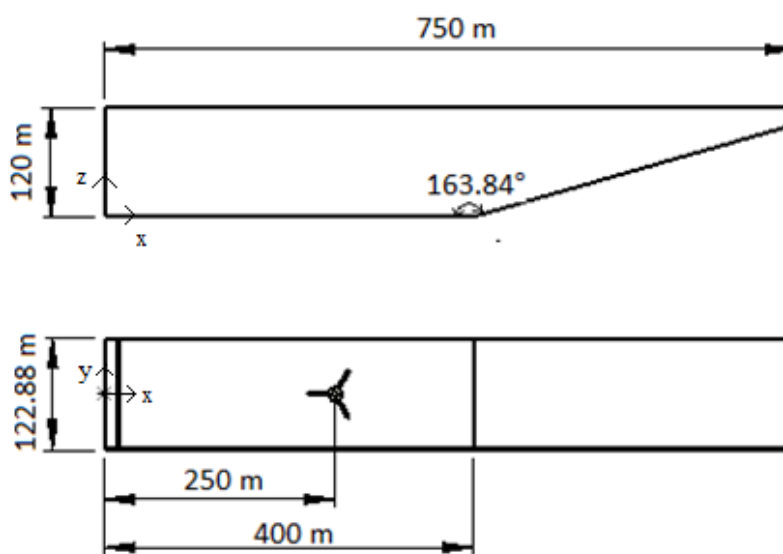


Figura 5.4 - Tanque utilizado nas simulações com a plataforma TLP

Como indicado na Figura (5.3), a plataforma DeepCwind está instalada num tanque com um comprimento de 750 *m* e largura de 122.88 *m*. O respetivo centroide situa-se a 250 *m* do gerador de ondas e a 63 *m* do fundo do tanque. O batedor tem um curso horizontal aproximadamente de 14 *m* e a profundidade do tanque é 68.2*m*.

No segundo caso de estudo, Fig. (5.4), a plataforma TLP está instalada num tanque com dimensões semelhantes ao anterior, apenas a altura das paredes verticais foi aumentada para 120 *m* para evitar a fuga de partículas do fluido do domínio de cálculo.

Neste trabalho são apresentados resultados para quatro casos distintos:

- Interação onda regular-DeepCwind;
- Interação onda irregular-DeepCwind;
- Interação onda regular-TLP;
- Interação onda irregular-TLP.

Mantém-se o valor da distância inicial entre partículas d_p e consequentemente, o número de partículas utilizadas de forma a comparar os resultados obtidos para as duas plataformas.

A Tabela (5.1) resume os parâmetros utilizados nas quatro simulações efetuadas.

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados nas simulações das plataformas DeepCwind e TLP

Parâmetros utilizados	Plataformas DeepCwind e TLP
Altura de onda (H, H_s)	5.0 <i>m</i>
Período de onda (T, T_s)	6 <i>s</i>
Profundidade (d)	68.2 <i>m</i>
Distância entre partículas (d_p)	2.0 <i>m</i>
Comprimento de onda (L)	56.2 <i>m</i>
Tempo máximo de simulação ($T_{máx.}$)	150 <i>s</i>
Número de partículas	563219

Foi considerado uma altura de onda $H = 5 \text{ m}$, por forma a reproduzir a agitação marítima próxima no litoral de Portugal Continental [26]. Para possibilitar a simulação dos casos de estudo com um tempo de cálculo tolerável, mantendo a precisão dos resultados, optou-se por utilizar $d_p = 2.0 \text{ m}$. Com os meios de cálculo utilizados, a uso de um d_p coerente com o exposto na Seção (4.2) conduzia a tempos de computação da ordem das semanas.

Para determinar a lei de geração da onda, recorreu-se aos parâmetros adimensionais: (5.1) e (5.2) e utilizou-se o gráfico (2.3). Para gerar uma onda com $H = 5 \text{ m}$, $T = 6 \text{ s}$ e $d = 68.2 \text{ m}$, concluí-se que se deve optar pela 2ª ordem da teoria de Stokes.

$$\frac{H}{gT^2} \approx 0.014 \quad (5.1)$$

$$\frac{d}{gT^2} \approx 0.193 \quad (5.2)$$

Analogamente ao efetuado no capítulo 4, para o pós-processamento das simulações, recorre-se ao programa *Paraview* de modo a obter o campo de velocidades e a posição da estrutura flutuante.

5.3. Cinemática da plataforma DeepCwind com agitação regular e irregular

Nas Figuras (5.5) e (5.6) apresentam-se a arfagem e o balanço da plataforma ao interagir com ondas regulares e irregulares, respetivamente.

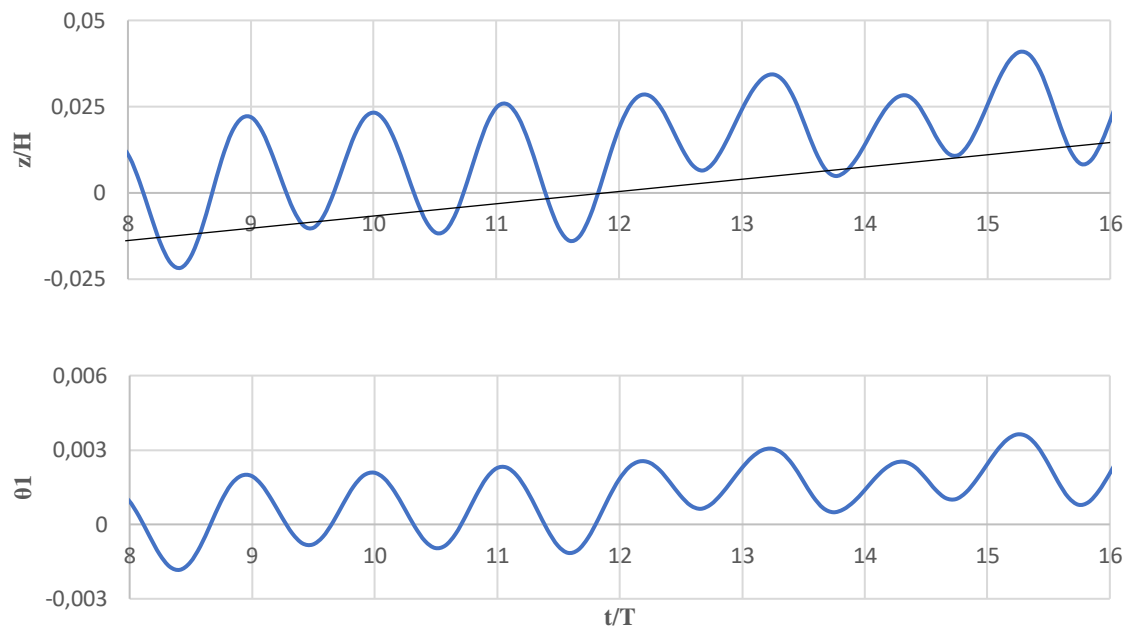


Figura 5.5 – Arfagem e balanço, plataforma DeepCwind, ondas regulares ($H = 5 \text{ m}$ e $d_p = 2 \text{ m}$)

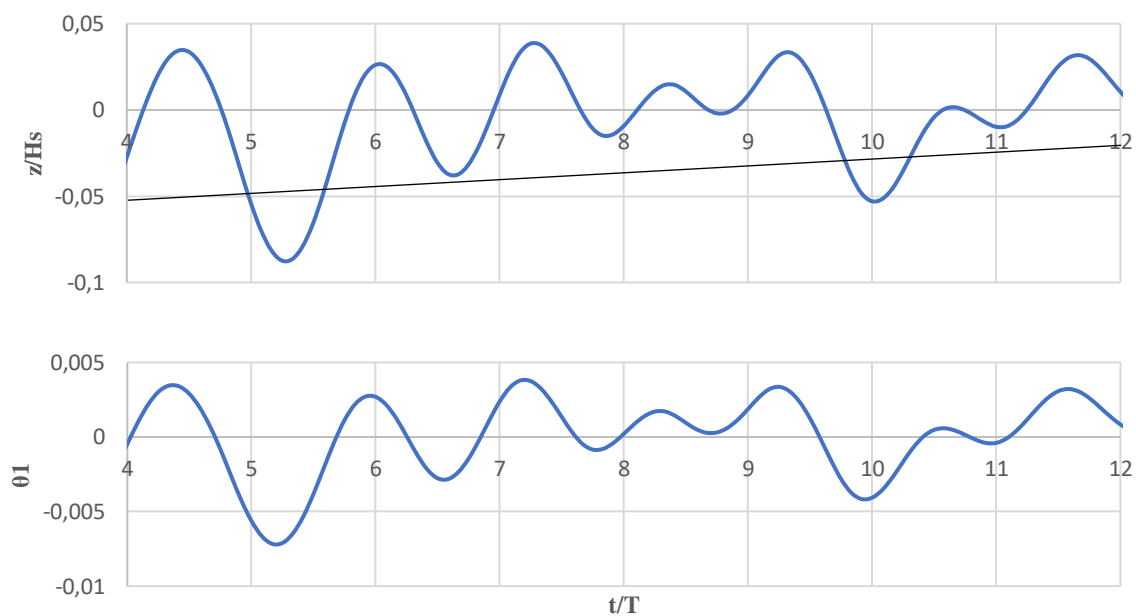


Figura 5.6 - Arfagem e balanço, plataforma DeepCwind, ondas irregulares ($H_s = 5 \text{ m}$ e $d_p = 2 \text{ m}$)

Os resultados obtidos para a arfagem, quer para ondas regulares quer para irregulares, apresentam uma crescente deriva do valor médio. Do ponto vista da física, tal só é possível se o nível médio da água subir.

Esta subida do nível médio da superfície livre viola a física do problema e uma vez que o código foi validado, apenas pode ser imputada à insuficiente discretização do domínio. Assim dever-se-ia aumentar o número de partículas. No entanto, como anteriormente referido, com os meios informáticos disponibilizados tal solução implicava tempos de cálculo desajustados.

Para que a arfagem tenha algum significado, calculou-se a linha de tendência de deriva. Esta apresenta um declive de 3.1×10^{-3} e está representada a negro na Figura (5.5). De igual forma para agitação irregular, Fig. (5.6), obteve-se uma linha de tendência com declive 4.7×10^{-3} .

Para o balanço verifica-se também um ligeiro aumento. No entanto, o seu significado pode ter realidade física uma vez que a plataforma tem apenas três eixos de simetria. Desta forma, pode rodar não adquirindo a sua posição inicial. Optou-se assim por não realizar uma linha de tendência de deriva.

Utilizando a linha de tendência estimou-se para valores máximos de amplitude da arfagem relativa 2.2% e 6.2% (o que equivale a um movimento vertical de 0.11 m e 0.31 m) para agitação regular e irregular, respetivamente. Para o balanço, obteve-se valores máximos no sentido direto e indireto de 0.22° e 0.6° para ambos os casos. Constatou-se assim que os valores do deslocamento vertical e da rotação são pequenos.

De forma a complementar o estudo, o campo de velocidade horizontal e a posição da plataforma offshore são obtidos com o código *Paraview*, Fig. (5.7) e (5.8) para ondas regulares e irregulares, respetivamente.

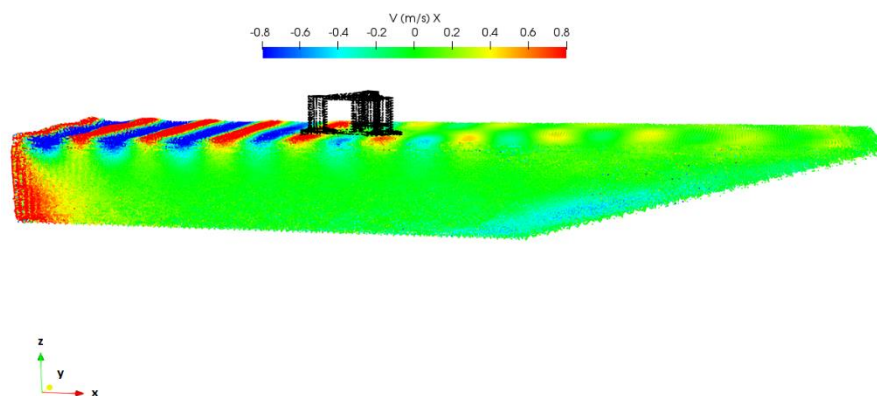


Figura 5.7 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma DeepCwind (ondas regulares)

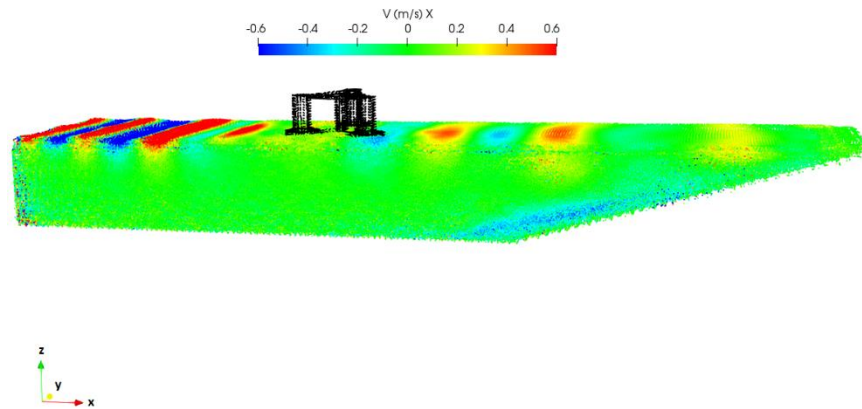


Figura 5.8 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma DeepCwind (ondas irregulares)

O movimentos das ondas e da plataforma pode ser obtido a partir do código *Paraview*.

Concluí-se assim que os valores máximos das amplitudes e da rotação da plataforma permitem prever que as condições de operacionalidade são satisfeitas para agitação regular e irregular.

5.4. Cinemática da plataforma TLP agitação regular e irregular

Analogamente ao estudo realizado para a plataforma DeepCwind, efetua-se um estudo dos movimentos (arfagem e balanço) para a plataforma TLP.

Nas Figuras (5.9) e (5.10) são apresentados os movimentos da plataforma TLP para a agitação regular e irregular, respetivamente.

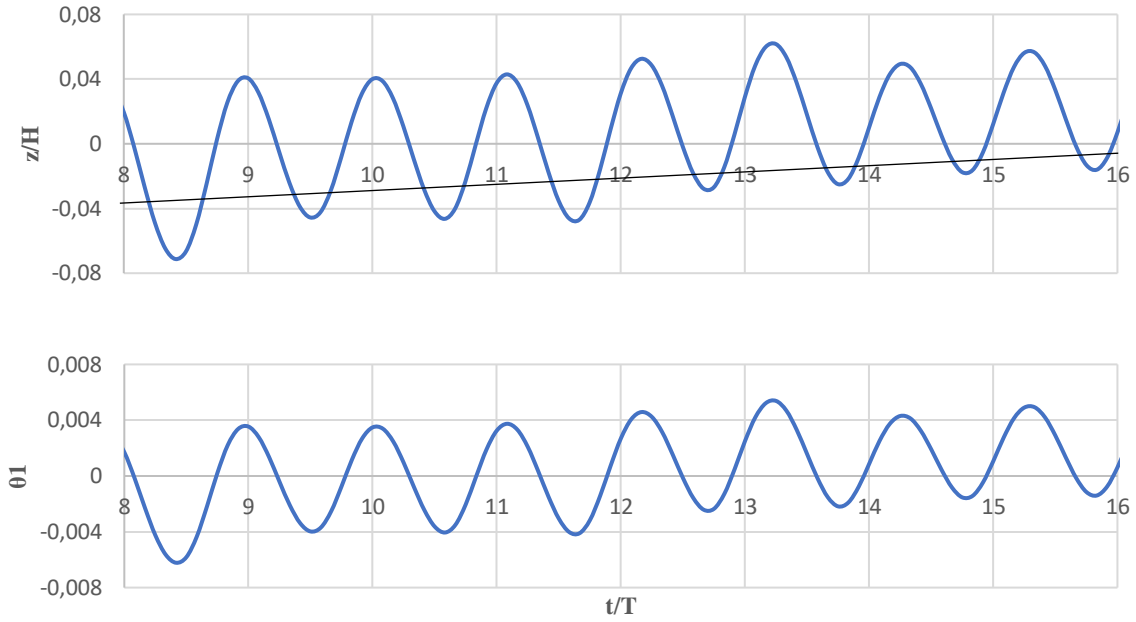


Figura 5.9 - Arfagem e balanço, plataforma TLP, ondas regulares ($H = 5 \text{ m}$ e $d_p = 2 \text{ m}$)

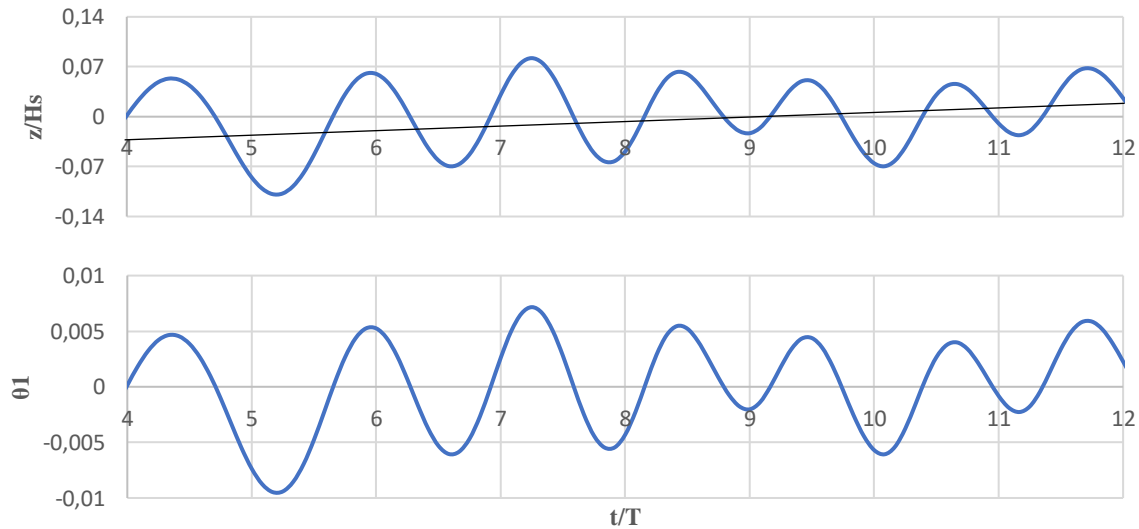


Figura 5.10 - Arfagem e balanço, plataforma TLP, ondas irregulares ($H_s = 5 \text{ m}$ e $d_p = 2 \text{ m}$)

À semelhança dos resultados obtidos para a plataforma DeepCwind, observando os resultados para a arfagem nas Figuras (5.9) e (5.10) da plataforma TLP, verifica-se novamente uma crescente deriva do valor médio devido à insuficiente discretização do domínio. Calculando a linha da tendência de deriva obteve-se um declive $4,6 \times 10^{-3}$ e $6,1 \times 10^{-3}$ representados a negro nas Figuras (5.9) e (5.10), respetivamente.

Nos resultados obtidos para o balanço, verifica-se um ligeiro aumento que indica que a plataforma roda não adquirindo a sua posição inicial, o que é consistente com a posição inicial dos seus eixos de simetria.

Recorrendo à linha de tendência estimou-se os valores máximos de amplitude da arfagem relativa 5% e 9.1% (o que equivale a um movimento vertical de 0.25 m e 0.46 m) para agitação regular e irregular, respetivamente. Para o balanço, obteve-se valores máximos correspondentes a rotações no sentido direto e indireto de 0.56° e 0.8° para ambos os casos de agitação.

De forma idêntica, o campo de velocidade horizontal e a posição da plataforma são obtidos com o código *Paraview*. Os resultados são apresentados nas Figuras (5.11) e (5.12) para agitação regular e irregular, respetivamente.

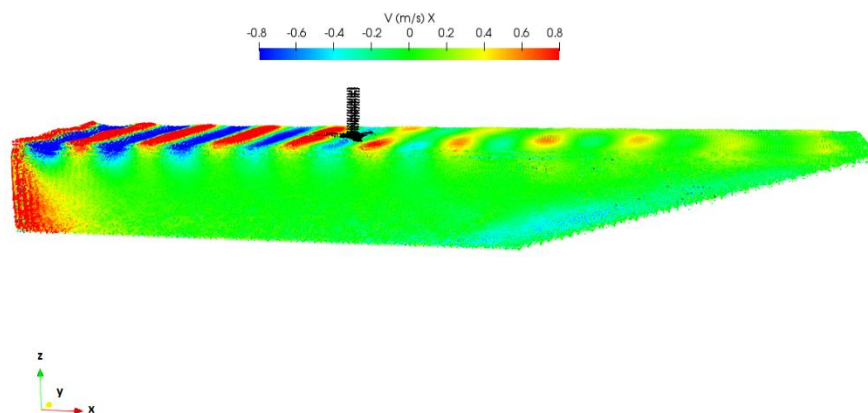


Figura 5.11 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma TLP (ondas regulares)

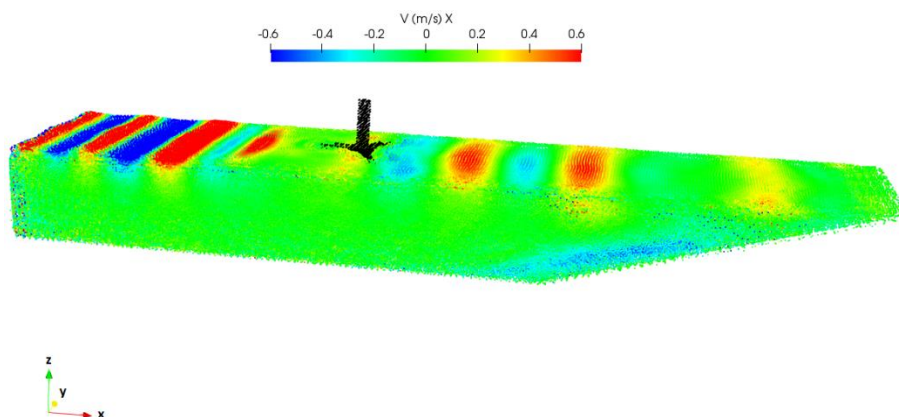


Figura 5.12 - Campo de velocidade horizontal e posição da plataforma TLP (ondas irregulares)

Analogamente aos resultados obtidos da plataforma DeepCwind, o balanço e a arfagem da plataforma TLP apresentam amplitudes máximas reduzidas, o que permite prever condições de operacionalidade para agitação regular e irregular.

5.5. Comparação da cinemática das plataformas DeepCwind e TLP

Obtidos os movimentos das plataformas DeepCwind e TLP é legítimo comparar a sua resposta e concluir sobre a sua estabilidade relativa quando sujeitas a agitação regular e irregular.

Nas Figuras (5.13) e (5.14) comparam-se os resultados obtidos para a arfagem e balanço das plataformas sujeitas a agitação regular e irregular, respetivamente. Esta análise é efetuada em condições de agitação ($H = 5\text{ m}$).

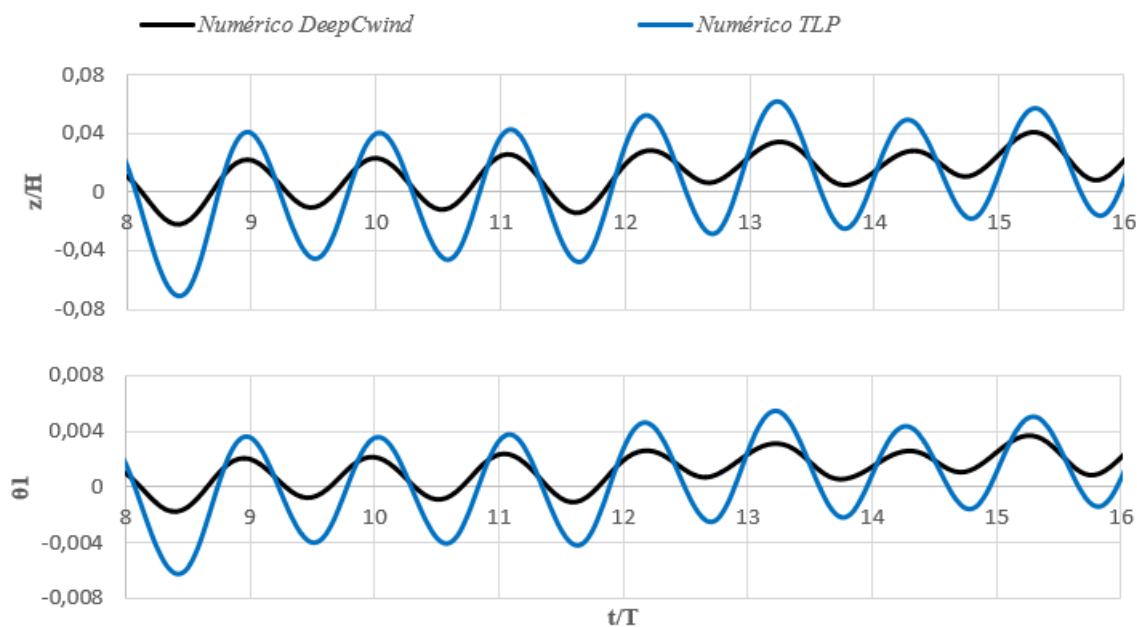


Figura 5.13 –Arfagem e balanço das plataformas, ondas regulares ($H = 5\text{ m}$)

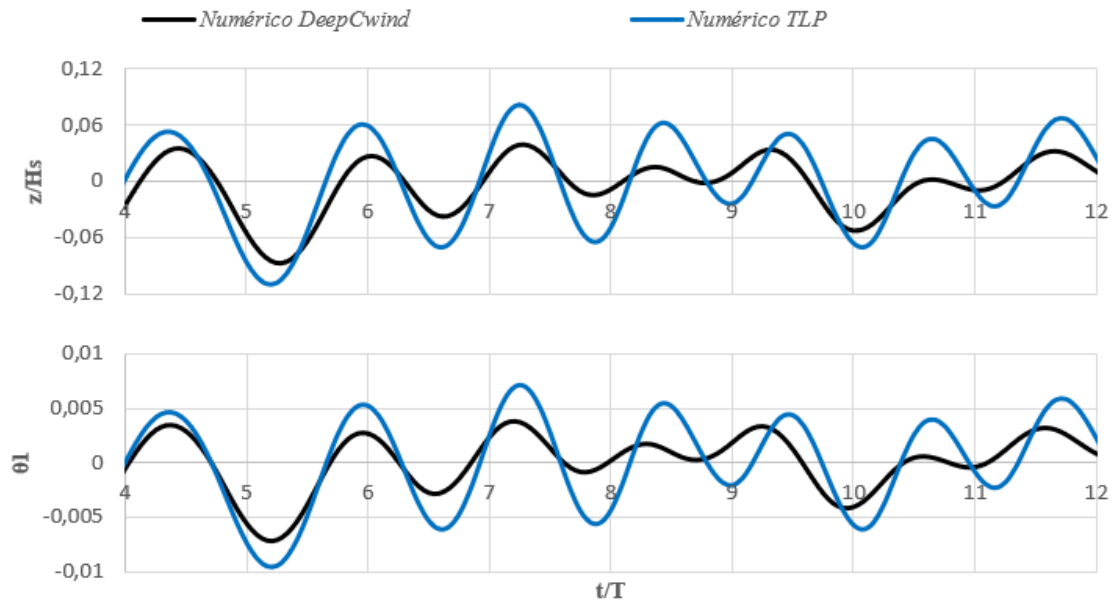


Figura 5.14 - Arfagem e balanço das plataformas, ondas irregulares ($H_s = 5$ m)

A observação das Figuras (5.13) e (5.14) permite concluir que a plataforma TLP apresenta maior amplitude tanto nos movimentos de arfagem como no de balanço. A diferença entre os valores máximos das duas plataformas para agitação regular é de 2.8% e de 0.34° , respetivamente. Para o caso da agitação irregular, a diferença entre os valores máximos são 2.9% e 0.2° , respetivamente.

Portanto, a generalidade dos resultados confirma que a plataforma DeepCwind apresenta-se mais estática que a plataforma TLP, o que alarga o seu domínio de operacionalidade.

6. Conclusão

O trabalho apresentado nesta dissertação centra-se no estudo numérico do comportamento das plataformas DeepCwind e TLP ao interagirem com agitação regular e irregular. Neste contexto, foi necessário caracterizar um escoamento com superfície livre e ondas propagantes e utilizar um código numérico que simule a dinâmica e cinemática de um corpo flutuante.

A metodologia adoptada consistiu, inicialmente, na modelação geométrica das plataformas a serem estudadas. Posteriormente, procedeu-se á definição das condições de fronteira e das condições de agitação por forma a verificar o modelo numérico DualSPHysics para o estudo realizado.

A verificação do modelo numérico foi realizada através da comparação dos resultados numéricos com dados existentes na literatura. A verificação consistiu num estudo bidimensional efetuado de duas formas distintas: (i) a dinâmica de um corpo flutuante com geometria retangular instalado num canal com profundidade 1.2 m foi validada analisando os esforços horizontais e verticais assim como o momento quando excitado por ondas regulares; (ii) a cinemática de um corpo flutuante com menores dimensões e para uma profundidade 0.4 m foi validada analisando a deriva, a arfagem e o balanço quando excitado por ondas regulares. Verificou-se também a importância de discretização através da análise efetuada à distância inicial entre partículas, $d_p = \frac{H}{10}$ e $d_p = \frac{H}{20}$, de modo a entender se a discretização utilizada assegura a necessária independência de resultados.

Seguidamente, procedeu-se a testes tridimensionais com uma caixa paralelepédica com seis graus de liberdade interagindo com agitação regular e irregular.

A boa concordância e a precisão verificada entre os resultados obtidos e os resultados numéricos existentes na literatura provam que o código DualSPHysics é útil no estudo da interação 2D e 3D onda-flutuador, no entanto, necessita de um grande esforço computacional.

Para o estudo do comportamento das plataformas DeepCwind e TLP, simularam-se os movimentos de arfagem e balanço para agitação regular e irregular. Com a discretização utilizada ficou patente que os resultados não eram independentes da mesma. Optou-se assim por criar uma linha de tendência para possibilitar a comparação dos resultados.

Relativamente ao balanço das plataformas, verificou-se uma rotação não recuperada, pois as plataformas podem rodar não adquirindo a sua posição inicial, uma vez que apresentam três eixos de simetria.

Quanto ao domínio de operacionalidade, concluiu-se que a plataforma DeepCwind apresenta-se mais estática que a plataforma TLP, o que alarga o seu domínio de operacionalidade. No entanto, ambas as plataformas apresentam valores máximos de deslocamento vertical e de rotação muito reduzidos.

Por fim, ainda que a qualidade dos resultados científicos tenha sido afetada pela desadequação do domínio de cálculo face aos meios informáticos disponíveis, em termos formação pessoal no domínio da simulação numérica, o objetivo do trabalho pode-se considerar obtido. Na verdade, com este trabalho consegui alargar os meus conhecimentos numa área inequivocamente útil na atividade de projeto e atual.

6.1. Desenvolvimentos para trabalhos futuros

De forma a dar sequência ao trabalho desenvolvido, será fundamental adequar a capacidade dos meios informáticos à complexidade do problema. Desta forma, deve-se garantir a independência dos resultados relativamente à discretização o domínio. Resolvido este problema fundamental, pode também ser estudada a influência que diferentes configurações geométricas possam ter no comportamento dinâmico das plataformas para agitação regular e irregular.

Numa fase posterior, a utilização de um código Lagrangiano pode ser útil no alargamento do estudo o efeito combinado do vento e da agitação marítima.

Por fim, a forte não linearidade deste tipo de códigos permite o estudo de sobrevivência em condições extremas, podendo inclusivamente ser implementada as condições fronteira relativas à amarração.

Bibliografia

- [1] A. Jain, A. N. Robertson, J. M. Jonkman, A. J. Goupee, R. W. Kimball, and A. H. P. Swift (2012), “FAST Code Verification of Scaling Laws for DeepCwind Floating Wind System Tests Anant”, Proc. Twenty-second Int. Offshore Polar Eng. Conf., no. 355–365.
- [2] B. Ren, M. He, P. Dong, and H. Wen (2015), “Nonlinear simulations of wave-induced motions of a freely floating body using WCSPH method,” Appl. Ocean Res., vol. 50, pp. 1–12.
- [3] J. S. A. do. Carmo (2016). Processos físicos e modelos computacionais em engenharia costeira. Coimbra University Press.
- [4] US Army Corps of Engineers (2002) “Coastal Engineering Manual-Part II”, USACE.
- [5] Holthuijsen, L. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] “Veja o Primeiro Parque Eólico Flutuante do Mundo | National Geographic.”. Available: <https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/2017/12/veja-o-primeiro-parque-eolico-flutuante-do-mundo>. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [7] W. Musial, S. Butterfield, and B. Ram (2006). “Energy from Offshore Wind: Preprint”.
- [8] A. Robertson, J. Jonkman, F. Wendt, A. Goupee, and H. Dagher (2016). “Definition of the OC5 DeepCwind Semisubmersible Floating System”.
- [9] B. Koo, A. J. Goupee, K. Lambrakos, and R. W. Kimball (2012), “Model Tests for a Floating Windturbine on Three Different Floaters,” Ocean Sp. Util. Ocean Renew. Energy, Vol. 7, p. 455.
- [10] A. N. Robertson et al. (2017). “OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine”. Energy Procedia, vol. 137, pp. 38–57.
- [11] K. P. Thiagarajan and H. J. Dagher (2014), “A Review of Floating Platform Concepts for Offshore Wind Energy Generation,” J. Offshore Mech. Arct. Eng., vol. 136, no. 2, p. 021906.
- [12] E. Didier, D. R. C. B. Neves, R. Martins, and M. G. Neves (2012), “Modelling of hydrodynamics around an impermeable breakwater: comparison between physical and sph numerical modeling”. Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 11, p. 68-76.
- [13] Brito M. (2017). “Desenvolvimento de uma ferramenta integrada para simular interações onda-estrutura”, 9as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, 23-24 de Novembro, Lisboa, Portugal.
- [14] Pereira, L. J. S. (2018). “Estudo numérico de um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas utilizando o método SPH”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

- [15] A. J. C. Crespo et al. (2015). “DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)”, *Comput. Phys. Commun.*, vol. 187, pp. 204–216.
- [16] F. Macià, M. Antuono, A. Colagrossi (2011). “Benefits of using a Wendland kernel for free-surface flows”, pp. 30-37.
- [17] M. Brito (2018). “Numerical modeling and experimental testing of an oscillating wave surge converter”, Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), Portugal.
- [18] R. B. Canelas, A. J. C. Crespo, J. M. Domínguez, R. M. L. Ferreira, and M. Gómez-Gesteira (2016). “SPH-DCDEM model for arbitrary geometries in free surface solid-fluid flows,” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 202, pp. 131–140.
- [19] A. Fog (2016). “Users Guide for DualSPHysics code DualSPHysics v4.0 April 2016,” no. April, p. 140.
- [20] J. Monaghan (1992). “Smoothed Particle”, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 30, pp. 543–574.
- [21] Brito M., Canelas R. B., Ferreira R. M. L., Teixeira L., Neves M. G. (2018). “Validation of DualSPHysics for modelling WECs with mechanical systems: Application to the OWSC”, 13th SPHERIC International Workshop, 26-28 de Junho, Galway, Ireland.
- [22] M. Brito et al. (2019). “A numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints”. *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2024–2043.
- [23] J. J. Monaghan (2005). “Smoothed particle hydrodynamics”. *Prog. Phys. Rep. Prog. Phys.*, vol. 68, pp. 1703–1759.
- [24] A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira, and R. A. Dalrymple (2007). “Boundary Conditions Generated by Dynamic Particles in SPH Methods”. *Computers, Materials and Continua*, 5(3), pp. 173-184.
- [25] B. J. Leimkuhler, S. Reich, and R. D. Skeel (1996). “Integration Methods for Molecular Dynamics”. *Mathematical Approaches to Biomolecular Structure and Dynamics*, pp. 161–185.
- [26] Pontes, M. T., Aguiar, R. e Oliveira Pires, H. (2003). “A Nearshore wave energy atlas for Portugal”. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 127(3): 249-255.